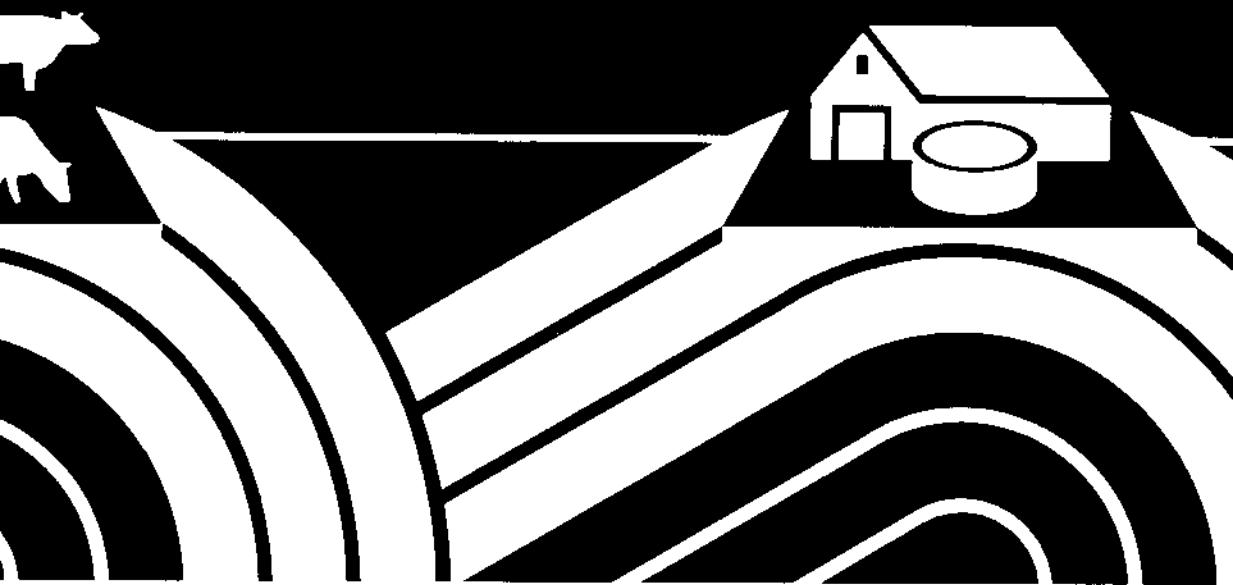


504.42.058  
B16

# NPo-forskning fra Miljøstyrelsen

Nr. C8 1990

## Kvælstof og fosfor i havet



Miljoministeriet **Miljøstyrelsen**

---

**NPo-forskning fra Miljøstyrelsen**  
**Nr. C8 1990**

# **Kvælstof og fosfor i havet**

Hanne Kaas, Henrik Kaas og Flemming Møhlenberg  
Danmarks Miljøundersøgelsésér

**MILJØSTYRELSEN**  
BIBLIOTEK  
STRANDGADE 56  
1401 KØBENHAVN K.

**Miljøministeriet**  
**Miljøstyrelsen**

## Indholdsfortegnelse

<u>Sammendrag</u>	5
<u>1. Indledning</u>	9
<u>2. Materialer og metoder</u>	12
2.1 Undersøgelsesstrategi	12
2.2 Undersøgelseslokaliteter	13
2.3 Næringssaltodynamik	14
2.4 Produktionsbegrensning	17
<u>3. Resultater</u>	19
3.1 Dægnvariation og lysafhængighed	19
3.2 Sydøstlige Kattegat	20
3.2.1 Hydrografi og vandkemiske parametre	20
3.2.2 Næringssaltoptag og remineralisering	23
3.2.3 Nitratbaseret primærproduktion	26
3.3 Øvrige Kattegat	27
3.4 <u>Chrysochromulina polylepis</u>	29
3.5 Vejle Fjord	32
3.5.1 Hydrografi og vandkemiske parametre	32
3.5.2 Næringssaltoptag og remineralisering	34
3.5.3 Kvalstofforbindelsernes betydning	36
3.6 Næringssaltbegrensning	37
3.6.1 Sydøstlige Kattegat	37
3.6.2 Vejle fjord	39

<u>4.</u>	<u>Diskussion</u>	40
4.1	Balancen mellem C, N og P optag	40
4.2	Næringssaltoptag og -remineralisering	41
4.2.1	Kattegat	41
4.2.2	Vejle Fjord	45
4.2.3	Balance mellem optag og remi- neraliserings	46
4.3	<u>Chrysocromulina</u> -opblomstringen	47
4.4	Produktionsstyrende faktorer	48
4.4.1	Næringsaltbegrensning	50
<u>Litteratur</u>		53
<u>Registreringsblad</u>		

## Sammendrag

Indhold	Kvalstof- og fosforomsætningen samt den relative betydning af kvalstofspecier (ammonium, nitrat og urea) og næringssaltenes betydning som produktionsstyrende faktorer blev undersøgt i det åbne Kattegat og i Vejle Fjord.
Lysafhængighed	I modsætning til ammoniumoptagelsen var den energikravende optagelse af nitrat-N og fosfat-P, som forventet, afhængig af lyset og viste de højeste optagelsesrater om dagen. Nitratoptagelsens lysafhængighed var stærkt afhængig af nitratkoncentrationen og af tilstedevarelsen af ammonium, som i høje koncentrationer "hemmede" nitratoptagelsen. Relationer mellem lysintensitet og optagelse blev etableret for hver prævetagning for udregning af døgnværdier.
Døgnrater	
Ammonium vigtigste kvalstofforbindelse	Ammonium var den vigtigste kvalstofkilde i så vel det åbne Kattegat som i Vejle Fjord. I det sydøstlige Kattegat udgjorde den ammoniumbaserede primærproduktion (= regenereret produktion) fra marts til november ca. 85 % af den totale produktion i overfladelaget. Urea viste sig uden væsentlig betydning. Specielt i sommer halvåret var den regenererede produktion dominerende, ensbetydende med en effektiv tilbageholdelse af næringssalte og recykling af næringssaltene mange gange inden udsynkning fra den fotiske zone (= det vandlag primærproduktionen foregår i).
Regenereret produktion i Kattegat 85 % af totale produktion	
Nitratbaseret produktion i Kattegat hovedsageligt i foråret	Hovedparten af den nitratbaserede produktion i Kattegat (= ny produktion = produktion baseret på nytiførte næringssalte) lå i foråret (40-60 %), og der var næje overensstemmelse mellem forbruget af nitrat-N i marts til april og det

	observerede fald i vandets koncentration af nitrat. En del af forårsproduktionen remineraliseres i vandsøjlen og ammonium bliver gradvist lige så betydningsfuld som nitrat. Algebiomassen og dermed næringssaltene kan dog ikke effektivt fastholdes i den fotiske zone, da antallet af grassere er lavt.
Episodisk ny produktion om sommeren	Nitratbaseret produktion kan episodisk have betydning om sommeren, når vindinduceret turbulens fører næringsrigt bundvand op i den fotiske zone. En indikation af dette blev set i august, hvor nitrat havde en relativ større betydning for primærproduktionen.
Reducerede kvalstofkilder vigtigst i Vejle Fjord	I Vejle Fjord dominerede de reducerede kvalstofforbindelser, primært ammonium, optaget på alle årstider. Samtidigt forekommende høje ammoniumkoncentrationer "hæmmede" nitratoptagelsen på de tidspunkter, hvor nitratkoncentrationerne var høje.
Konceptet om ny og regenereret produktion uanvendeligt i helt kystnære områder	Konceptet for åbne havområder at ny-produktion alene er baseret på nitrat kan ikke anvendes i de kystnære områder, hvor "nyt" kvalstof i høj grad tilføres i reduceret form. En tydelig gradient i ammoniumkoncentrationen gennem fjorden viste at en væsentlig mængde reduceret kvalstof tilføres fra land.
Tilførsel af kvalstofnæringsstoffer fra land og fra sedimentet vigtig i Vejle Fjord	Remineraliserede næringsalte fra sedimentet i Vejle Fjord var sandsynligvis en væsentlig næringsstofkilde i september, hvor der var en massiv opblomstring af dinoflagellaten <u>Prorocentrum minimum</u> . Remineraliseringen i vandet kunne på dette tidspunkt ikke svare for ammoniumoptagelsen, og lave koncentrationer understøttet og yderst i fjorden taler imod advektiv tilførsel. Den nødvendige mængde ammonium kan beregnes til $6-7 \text{ mmol/m}^2/\text{d}$ , hvilket peger på bundfaunaens betydning for remineraliseringen.

**Rumlig adskillelse af optagelse og remineralisering i Vejle Fjord** Den rumlige adskillelse af optagelsen og remineraliseringen af næringssalte i Vejle Fjord førte til stærkt varierende og markante ubalance mellem forbruget og produktionen af ammonium og fosfat i vandssjøen.

Ubalance i ammoniumoptaget og ammoniumproduktionen i det åbne Kattegat - remineraliseringen oversteg i gennemsnit optagelsen med 67 % - skyldes sandsynligvis metodiske problemer med bestemmelse af remineraliseringen.

**Kvalstof vigtigste styrende faktor for primærproduktionen** Kvalstof var den vigtigste styrende faktor for primærproduktionen i det åbne Kattegat. I sommerhalvåret viste forholdet mellem de maksimale og de aktuelle optagelsesrater tydelig fysiologisk kvalstofbegrensning af algerne, og primærproduktionen var stærkt korreleret til kvalstofkoncentrationen (Spearman Rank Correlation). Sammenhængen mellem primærproduktionen og opløst kvalstof var lineær. I Vejle Fjord var der i juni samtidig indicier på kvalstof- og fosforunderskud. Primærproduktion var i juni og september signifikant korreleret til koncentrationen både fosfat og opløste næringssalte.

**Samtidig N og P-underskud i juni i Vejle Fjord**



## 1. Indledning

Samspillet i det kemiske, biologiske og fysiske miljø bestemmer havets produktivitet

For at forstå eutrofieringseffekter og ikke mindst, for at vurdere virkningen af fremtidige belastningsreduktioner, er det nødvendigt at kende og forstå sammenhængen mellem de processer, som styrer primærproduktionen i havet. Foruden kvalstof og fosfordynamikken, spiller fluxen og omsætningen af kulstof, oxygen og silikat en stor rolle for havets produktivitet, og der er et tæt samspil mellem disse processer. Endelig har det fysiske miljø, herunder især hydrografien en afgørende indflydelse på, hvilken effekt tilledningen af næringssalte får i det marine miljø.

Pelagial næringssaltomsætning

På baggrund af de seneste års forskning i kystnære områder og især oceanerne, er der etableret en række modeller for den pelagiale næringssaltomsætning i det marine miljø.

Nitrat og ammonium, de vigtigste kvalstofforbindelser

Kvalstof findes i havet i flere for planteplanktonet tilgængelige kemiske forbindelser, hvor opstået uorganisk nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) og ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) har den største betydning for produktionen. Urea kan i særlige tilfælde også have en signifikant betydning (Sörensson et al. 1989, McCarthy et al. 1977 og Furnas 1983), mens andre organiske kvalstofforbindelser ikke spiller nogen større rolle.

Regenereret og ny produktion

På baggrund af forskelle i oprindelsen af nitrat og ammonium i åbne havområder foreslog Dugdale og Goering (1967) primærproduktionen delt op i to komponenter: regenereret produktion, som er baseret på næringssalte regenererede i den fotiske zone, og ny produktion baseret på næringssalte tilført den fotiske zone.

Ny produktion  
kan være årsag  
til iltsvind

Modellen vandt stort indpas bl.a. fordi den blev kombineret med teorier om skabnen af algebiomassen produceret ved de to processer. I systemer domineret af regenereret produktion vil det fikserede kulstof "brændes" op i fødekæden, og der vil ikke være mulighed for en væsentlig eksport ud af systemet. I systemer med høj ny produktion kan en stor del af produktionen derimod eksporteres ud af systemet (Smetacek og Poliehn 1986). Hvis eksporten sker ved udsynkning af organisk materiale i områder med stagnantere eller lagdelte vandmasser, vil nedbrydningen af det organiske materiale medføre et stort iltforbrug, som kan give ophav til iltsvind med deraf følgende effekter.

#### ÅBENT HAV

For oceanerne er opgørelsen af ny respektiv regenereret produktion enkel, idet "nye" kvalstofnæringsalte som danner grundlag for ny produktion altovervejende tilføres i form af nitrat-N, mens den regenererede produktion er baseret på reducerede *in situ* remineraliserede kvalstofforbindelser (fortrinsvis ammonium).

Forårsproduktion  
= ny produktion  
Sommerproduktion  
= regenereret  
produktion

I Kattegat formodes forårsproduktionen at være domineret af ny produktion bygget på den gennem vinteren akkumulerede nitratpulje, mens sommerproduktionen fortrinsvis bygger på regenererede næringsalte.

Episodisk ny produktion om sommeren

Episodisk ny produktion, forekommer sandsynligvis om sommeren i forbindelse med blæsevejr, idet dette medfører erosion på det næringsrige bundvand.

I de helt kystnære områder vil ny produktion spille en stor rolle, men en opgørelse af størrelsen af ny og regenereret produktion van-

KYSTNÆRE OMRÅDER  
Tæt kobling  
mellan vandssjæle  
og bund

skeliggøres af at tilførslerne kan ske både i form af nitrat og ammonium. En tæt kontakt mellem vandssjælen og sedimentet gør endvidere, at den pelagiale omsætning ikke kan betragtes separat, men må kobles sammen med processerne ved bunden. I de helt kystnære områder er produktionen således tæt knyttet til tilførsler fra såvel land som fra sediment, og rumlig og tidemæssig afkobling mellem tilførsel og produktion kan give sig udtryk i ubalance og stor variabilitet i det produktive system.

N og P som produktionsbegrensende faktorer

Kvalstof anses for at være den primære styrende faktor for primærproduktionen i marine områder, mens fosfora indflydelse synes begrænset til specifikke områder eller korte tidsrum (Chiaudani og Vighi 1982, Sakshaug og Olsen 1986, Mahoney 1989). For danske farvande er der i NPO-redegørelsen (1984) angivet forskellige "begrensningstyper" baseret på mængden af op løste uorganiske næringsalte i vandet. Koncentrationen af næringsalte vil imidlertid være et udtryk for forholdet mellem næringssalttop-tagelse og -tilførsel, og lave koncentrationer kan være udtryk for en tæt kobling mellem disse to processer uden at algerne nødvendigvis er begrænsede. Enkelte danske områder er undersøgt for næringssaltbegrensning ved langtidsberigelsesforsøg, eksempelvis demonstreredes i Limfjorden fosforbegrensning tidligt på sommeren og kvalstofbegrensning resten af sommeren (Lyngby 1986). Tilsvarende forsøg i Laholm Bugten i det sydøstlige Kattegat og i Østersøen har demonstreret, at kvalstof spiller den største rolle som styrende faktor for primærproduktionen i disse områder (Granéli 1987, Granéli et al. 1990).

Danske undersøgelser af næringssaltomsætningen har været koncentreret om processer i sedi-

Dynamikken i  
de frie vand-  
masser

mentet. Formålet med dette projekt er at undersøge næringsstofdynamikken i de frie vandmasser i de indre danske farvande. Undersøgelser af den pelagiale omsætning af næringsstofte i vores havområder er begrænset til svenske undersøgelser i Laholm Bugten i det sydøstlige Kattegat og i Skagerrak. Vores undersøgelser har været koncentreret om betydningen af forskellige næringsstoffer, remineralisering samt kvalitets- og fosfors betydning som produktionsstyrende faktorer.

Taksigelser. Projektet er gennemført med støtte fra Miljøstyrelsen og Danmarks Miljøundersøgelser (DMU). Ved den praktiske gennemførsel af undersøgelsen har vi modtaget stor hjælp fra laboranter og studenter ved DMU, og vi vil særligt takke Hanne Ferdinand, Peter Kofoed, Gitte Jørgensen, Anne Røjgaard, Jesper Andersen og Kurt Larsen for deres tekniske assistance og store tålmodighed med os. Ligeledes takker vi Helle Kofoed for hjælpen under skrivefasen.

Undersøgte  
stationer

Intensivt

Strategien i projektet har været at kombinere et intensivt prøvetagningsprogram på én station med ekstensive undersøgelser på stationer, der karakteriserer Kattegat, Store Bælt og Vejle Fjord (Figur 1). Undersøgelserne på intensivstationen (A) i det sydøstlige Kattegat dækker grundlæggende dynamiske aspekter (døgn- og dybdevariation, lysafhængighed etc.) samt varia-

Ekstensivt

tionen i næringsaltdynamikken gennem året, mens undersøgelserne på ekstensivstationerne (B-E, Vejle Fjord) giver omsætningen på udvalgte årstider.

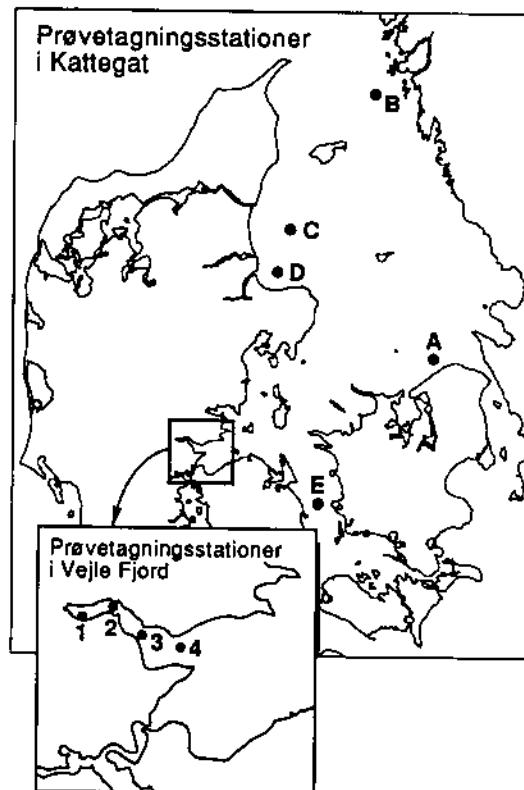
## 2.2. Undersøgelseslokaliteterne.

Kattegat

St. A - intensiv stationen

Intensivstationen (A) ligger i det sydøstlige Kattegat, hvor der i de senere år hyppigt er konstateret iltsvind (Figur 1). Produktiviteten er høj i området og der er påvist en signifikant øgning i primærproduktion og kvalstofkoncentrationen i løbet af de sidste 25-40 år (Ertebjerg et al. 1990). Stationen blev besøgt 17 gange i løbet af undersøgelsesperioden (1988-89).

**Figur 1.**  
Prøvetagningstationer i Kattegat og Vejle Fjord. St. B, C, E er identiske med de statslige overvågningsstationer 1001, 409 og 939. St. 1-4 er identiske med Vejle Amts overvågningsstationer 3772, 4273, 4669 og 5367.



St. B,C og E Station B, C og E repræsenterer forskellige dele af Kattegat/Store Bælt med varierende vanddybder og hydrografiske forhold. Stationerne er karakteriseret ved at være lagdelte med et eller flere saltspringlag. Kun i perioder med kraftig storm vil der på st. A og E ske en opblanding af vandsøjlen til bunden. På st. C er der p.g.a. den lave vanddybde og de hydrografiske forhold periodevis kontakt mellem overfladevand og bund. Station D i Hvrting Bugt blev bøsigt ekstraordinært i forbindelse med Chrysochromulina forekomsten i maj og juni 1988. Stationen ligger i det område, hvor de højeste koncentrationer af C. polylepis blev konstateret.

Vejle Fjord Stationerne i Vejle Fjord er placeret langs et transekt gennem fjorden. Lagdeling kan forekomme i kortere perioder (hyppigst på den yderste station), men almindeligvis er vandsøjlen op blandet til bunden.

### 2.3 Næringssaltodynamik

Parametre Næringssaltodynamikken blev undersøgt ved målinger af planktonets optagelse og remineralisering af kvælstof- og forsformæringsalte, idet isotopteknikmetoden blev brugt (den stable isotop N-15 og den radioaktive isotop P-32). Ved optagelsesforsøgene blev optagelsen af fosfat-P, ammonium-N og nitrat-N samt i begrænset omfang urea-N målt. Remineraliseringsforsøgene omfattede målinger af udskillelsen af ammonium-N og fosfat-P. Målingerne blev gennemført på vand fra 1-2 dybder afhængigt af tykkelsen af det øvre opblandede vandlag. Alle inkubationer foregik i 2.5 liters beholdere under simulerede in situ forhold enten om bord

på undersøgelsesskibe (Kattegat) eller på land (Vejle Fjord).

N-15-målinger

N-15-berigelsen i det partikulære materiale (N-optagelsen) og N-15-fortyndingen i vandet (N-remineraliseringen) blev målt ved emission-spektrometri (Såby Johansen 1984). Forberedelsen af prøverne til spektrometri skete ifølge Kristiansen og Paasche (1982) og Selmer og Sørensson (1986).

Flere koncentrationer tilsat

For N-15-eksperimenterne gjorde brugen af flere koncentrationer (2-3) det muligt (under forudsætning af, at planktonets næringsaltoptagelse følger Michaelis-Menten kinetik) at beregne de aktuelle optagelsesrater ved de i vandet forekommende næringsaltkoncentrationer, uanset om den laveste tilsætning var på trace-niveau. Desuden kunne den maksimale optagelsesrate beregnes.

Beregning

Optagelsesraterne for nitrat og urea er beregnet efter Dugdale og Wilkerson (1986), og beregningerne af ammoniumoptag og -remineralisering i henhold til Laws (1985). For ammoniumoptagelsen er der taget hensyn til den remineralisering, der forekom i incubationsperioden.

P-32-målinger

P-optagelsesraten blev bestemt ved 2 (3) koncentrationer (trace-tilsætning og 1-2 berigelser, sidstnævnte ved tilsætning af "kold" fosfat udover P-32). P-remineraliseringen blev bestemt samtidigt ud fra ved isotopfortyndingen i vandet. Partikulært og opløst P-32 blev målt på scintillationstæller og beregningerne foretaget i henhold til Harrison & Harris (1986).

Samtidige incubationer med N-15, P-32 og C-14

Parallelt med optagelsen af kvælstof og fosfor (i samme vandprøve) blev planktonets primærproduktion ( $\text{CO}_2$ -fiksering) bestemt ved at måle

<sup>14</sup>C-inkorporeringen i det partikulære materiale.

Beregning af døgnværdier

Da forsøgene er udført under meget forskellige lysforhold er de absolutte optagelsesrater for sammenlignelighedens skyld beregnet på døgnbasis ved 25 % og 10 % lys (Kattegat) eller i 2.5 meters dybde (Vejle Fjord). Beregningerne er sket på basis af målte relationer mellem optagelsesrater og lysintensitet samt målte døgnvariationer. Lysintensiteten er beregnet på timebasis udfra insolationsstal fra DMI.

Vandkemiske parametre og hydrografi

I forsøgsdybderne måltes næringssalt- (ammonium, nitrat, nitrit og fosfat), klorofyl- og de partikulære kvalstof-, fosfor- og kulstofkoncentrationer. Derudover måltes ved hver prøvetagning dybdeprofiler af salinitet, temperatur, fluorescens og lysuds Lukning.

Næringssaltbestemmelse

Næringssaltkoncentrationerne blev analyseret med en autoanalyser (nitrat) - eller ved manuelle colorometriske målinger (ammonium og fosfat). Urea-koncentrationerne kunne normalt ikke bestemmes analytisk på grund af meget lave koncentrationer. Koncentrationen blev derfor bestemt v.h.a. de specifikke optagelseshastigheder (for 3 koncentrations-tilsætninger), idet det blev forudsat at hastighederne (reciprokke) i et Lineweaver-Burk-plot skal ligge på en ret linie. Den koncentration, der gav det bedste plot, blev valgt. Forsøg med ammonium og nitrat, hvor næringssstofkoncentrationerne var kendte, underbyggede, at det er en acceptabel metode til koncentrationbestemmelse.

Urea bestemmelse

## 2.4 Produktionsbegrænsning

Puljeforhold og fysiologiske parametre

Planteplanktonets næringsstilstand, og dermed kvalstofs og fosfors betydning som produktions begrænsende faktorer, blev vurderet udfra en række indeks. Udover puljeforhold (C:N og N:P forhold i vandet og det partikulære materiale) anvendtes en række fysiologiske indeks. Disse er baseret på ændringer dels i kulstoffikseringen dels i kvalstof- og fosforoptagelseshastighederne ved tilslætning af høje koncentrationer af næringssalte.

Korttidsforsøg

Forsøgene til bestemmelse af næringssaltenes betydning blev udført parallelt eller i kombination med omsætningsforsøgene; der var således tale om korttidsforsøg med minimale ændringer i algesammensætning m.m..

Fysiologiske indeks

De anvendte indeks omfattede 1) forholdet mellem kulstoffiksering i lys med og uden næringssaltilslætning, 2) forholdet mellem kulstoffiksering i mørke med og uden tilslætning af ammonium samt 3) forholdet mellem den maksimale ( $V_{max}$ ) og aktuelle ( $V_{amb}$ ) specifikke optagelsesrate af et givent næringssalt.

Kulstoffiksering i lys

Kulstoffikseringen i lys kan ved tilslætning af et begrænsende næringssalt enten stige umiddelbart (Healey 1974) eller udvise et midlertidigt fald, idet energien bruges til at optage og indbygge det begrænsende næringssstof (Falkowski og Stone 1975, Elrifi og Turpin 1985).

Kulstoffiksering i mørke

Kulstoffikseringen (og ammoniumoptagelsen) i mørke vil ofte stige ved ammoniumtilslætning under kvalstofbegrænsende forhold. En fordobling af forholdet mellem kulstoffiksering i

mørke med og uden tilsetning af ammonium ("Ammonium Enhancement Ratio", Yentsch et al. 1977), er foreslæt som grænse for N-begrænsning.

$V_{max}$  og  $V_{amb}$

Forholdet mellem  $V_{max}$  og  $V_{amb}$  er i modsætning til kulstoffikseringen et direkte mål på algernes reaktion på øgede næringssaltkoncentrationer. Den teoretiske baggrund er Michaelis-Menten kinetikens forudsigelse af øgede optagelsesrater ved øgede koncentrationer af et begrænsende stof (indtil mætningskoncentrationen og dermed  $V_{max}$  er nået). Undersøgelser har desuden vist, at  $V_{max}$  øges ved næringssaltbegrænsning (Lean og Pick 1981, Glibert og McCarthy 1984 og Suttle og Harrison 1988) og dette vil forstærke indekset.

Den fysiologiske baggrund er, at algcellernes mekanismer for optag og inkorporering af et næringssalt er maksimalt aktive, når det pågældende næringssalt er i underskud. Dette sætter algerne i stand til at udnytte momentant forhøjede koncentrationer af næringssalte (f.eks. udskilt fra dyr) omkring cellerne. En øget  $V_{max}$  ved næringssaltbegrænsning vil derfor være mest indlysende for de remineraliserede forbindelser (ammonium, urea og fosfat).

Alkalisk fosfatase

Specielt til påvisning af fosformangel blev den alkaliske fosfatase aktivitet målt. Dette enzym kan frigøre fosfat fra organiske molekyler og induceres hos de fleste alger ved forsforbe- grænsning. Aktiviteten skal ses i forhold til biomassen (Healey og Hendzel 1979), og det antages, at aktiviteten skal være over 0.3  $\mu\text{mol P/min/mg klorofyl}$ , før der er tale om fosforbegrænsning.

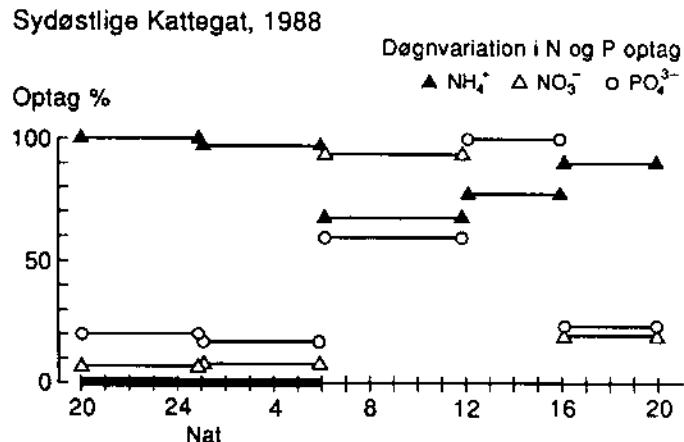
### 3. Resultater

#### 3.1 Døgnvariation og lysafhængighed

For at kunne udregne planktonalgernes daglige forbrug af kvalstof og fosfor blev der gen-

Figur 2

Døgnvariationen i optagelsen af ammonium-N, nitrat-N og fosfat-P på station A i det sydøstlige Kattegat. Værdierne er angivet relativt således at den højeste optagelse for hver parameter er sat til 100%.

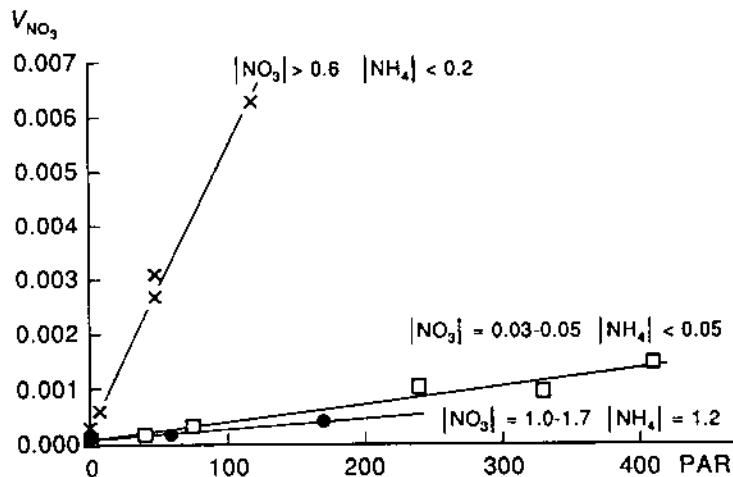


nemført en række optagelsesforsøg, dels gennem udvalgte døgn, dels ved forskellige lysintensiteter. Som det fremgår af Figur 2 er især optagelsen af nitrat stærkt varierende gennem døgnet med meget lave optagelsesrater om natten og maksimal optagelse i dagtimerne. For fosfat var mørkeoptagelsen hemmet i mindre grad, mens ammoniumoptagelsen generelt viste langt mindre variation. Nitratoptagelsens entydige afhængighed af lysintensiteten er endvidere vist i Figur 3. Det fremgår ligeledes, at den specifikke nitratoptagelse ( $V_{NO_3}$ ) er stærkt afhængig dels af nitratkoncentrationen og dels af tilstedeværelsen af NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, som i høj koncentration virker "hæmmende" på nitratoptagelsen.

Nitratoptagelsen afhængig af lys samt nitrat- og ammoniumkoncentrationen

For hver prøvetagning er der etableret sammenhænge (oftest lineære) mellem lysintensitet og optagelseshastighed af nitrat, ammonium og fosfat (urea) samt kulstof. Med baggrund i disse sammenhænge og lysindstrålingen i et gennemsnitsdøgn i de respektive måneder er optagelserne udregnet på døgnbasis.

**Figur 3.**  
Nitratoptagelsens afhængighed af lysintensitet (PAR i  $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) ved forskellige nitrat- og ammoniumkoncentrationer.



### 3.2 Det sydøstlige Kattegat

#### 3.2.1

##### Hydrografi og vandkemiske parametre

Saltholdigheden i overfladelaget i sydøstlige Kattegat (st. A) faldt fra ca. 20 ‰ i marts til et minimum på 12 ‰ primo maj (Figur 4A). April-maj var præget af lav vindaktivitet og en udpræget lagdeling af vandsøjlen. I maj og medio juni var der etableret et sekundært saltspringlag i 4-5 m dybde. De høje saltholdigheder i august, september og den 1. november var resultatet af en vindgenereret erosion af

ned til 18-20 m. Den 1. november var vandssjøen opblandet helt ned til bunden.

Høje nitrat- og fosfatkoncentrationer i foråret

Koncentrationen og fordelingen af opløste næringsalte (Figur 4B) viste det generelle mønster med høje koncentrationer af især nitrat og fosfat i begyndelsen af marts, markant faldende næringssaltkoncentrationer i slutningen af marts og gennem april og meget lave koncentrationer gennem sommeren. De laveste koncentrationer blev målt i forbindelse med etablering af det sekundære saltspringlag den 3. maj og den 13. juni ( $\text{NO}_3^- < 0.04$ ,  $\text{NH}_4^+ = 0.02-0.05$ ,  $\text{PO}_4^{3-} = <0.02-0.05 \mu\text{M}$ ). I efteråret steg koncentrationen af næringsalte; stigningen var mest udpræget for  $\text{NH}_4^+$ , som havde temporære maxima i oktober og primo november.

Lave næringssaltkoncentrationer om sommeren

Høje ammoniumkoncentrationer i efteråret

Algebiomassen højest forår og efterår

Biomassen af plantoplankton, målt som klorofyl, viste maxima dels i begyndelse af april dels i oktober, hvor næringssaltkoncentrationerne var høje (Figur 4C). Ved prøvetagningen den 22. marts var der vindstille, og algerne var sedimenteret ud af overfladelaget og lå i 10-15 m's dybde. I perioden mellem den 7. marts og 22. marts har der således været en betydelig primærproduktion, hvilket også understreges af halveringen i nitratkoncentrationen.

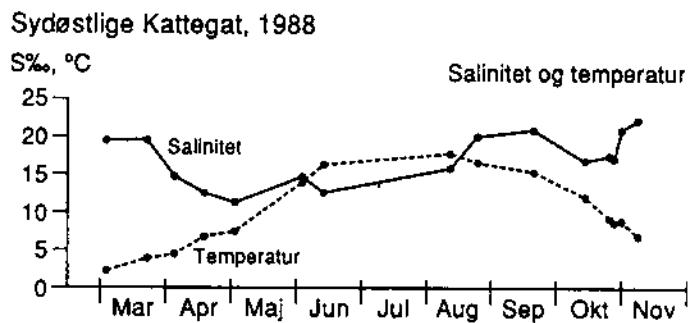
Springlags-opblomstring af Chrysochromulina

I den næringsfattige periode i maj-juni var algkoncentrationen i overfladen lav med minimum i juni på 0.3-0.6 µg klorofyl/liter, mens der ved det primære saltspringlag var en massiv opblomstring af stilkalgen Chrysochromulina polylepis.

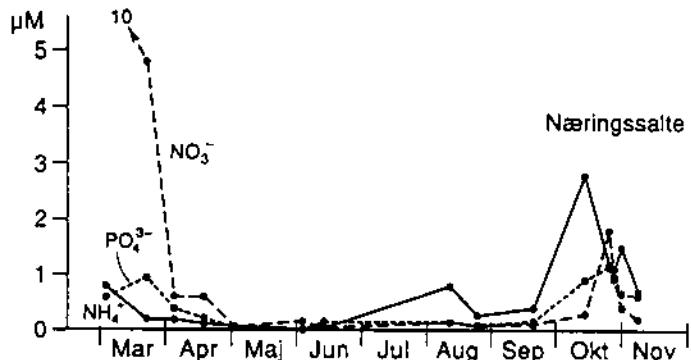
Koncentrationen af partikulært kvalstof (PON) varierede betydeligt gennem året (Figur 4D).

**Figur 4.**  
Årstidsvaria-  
nen på station A  
i det sydøstlige  
Kattegat i over-  
fladelagets

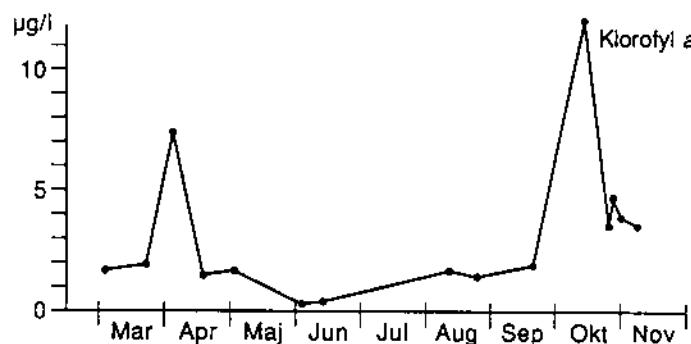
A. salinitet og  
temperatur



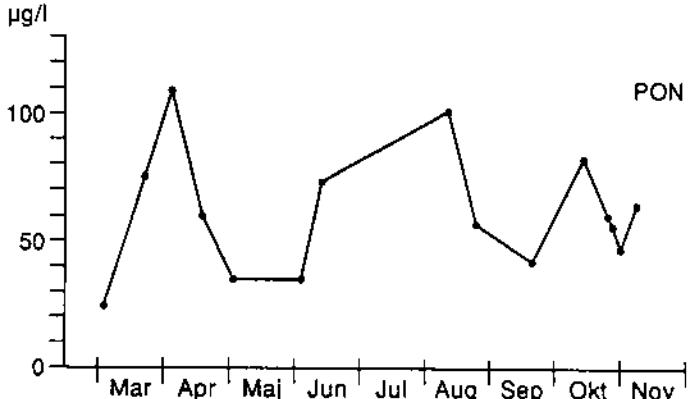
B. næringssalt-  
konzentrationer



C. algebiomasse  
udtrykt som klorofyl a



D. koncentration  
af partikulært  
kvalmstof (PON)



Algernes andel udgjorde i april og oktober 20-40 % og 40-80 %, henholdsvis, hvis man antager et N/klorofyl-forhold på 3-6. For resten af året var algernes andel betydeligt lavere.

### 3.2.2

Årstidsvariationen i næringsatofoptagelsen fulgte primærproduktionen

#### Optag og remineralisering

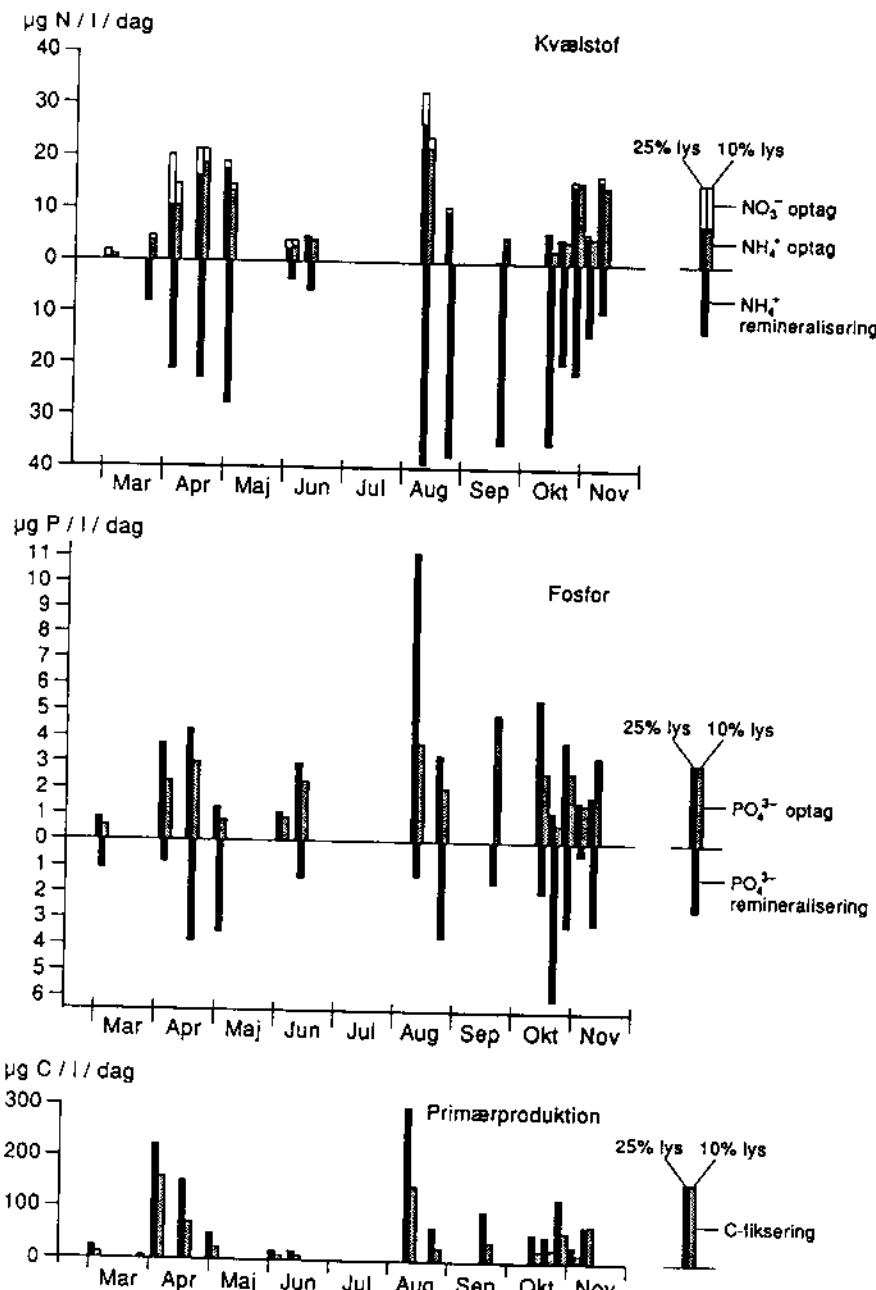
Den årlige variation i optag af kvalstof og fosfor fulgte kvalitativt primærproduktionen med store optagelsesrater under forårsmaximumet i april, lav optagelse i juni, meget stor optagelse i midten af august og en relativ høj optagelse i oktober (Figur 5). Det gennemsnitlige optag af C, N og P på 65/11/1 (molar basis, n=23) afveg betydeligt (mest udpræget for fosfat) fra "Redfield ratioen" 106/16/1. For flere prøvetagninger, bl.a. den 13. juni, var afvigelsen endnu mere markant.

Primærproduktionen og fosfatoptagelsen var generelt lavere i 10 % dybde end i 25 % lys-dybden, mens kvalstofoptagelsen var langt mindre afhængig af dybden/lyset (se også Figur 2 og 3).

Remineraliseringen afhænger af temperaturen og substratmængden

Remineralisering af både ammonium og fosfat viste betydelig variation gennem året. Kvalitativ synes remineraliseringen både at afhænge af temperaturen (mest udpræget for ammonium) og substratmængden (=algekoncentrationen, primærproduktionen). Substratafhængigheden ses bl.a.

Sydøstlige Kattegat, 1988



**Figur 5**

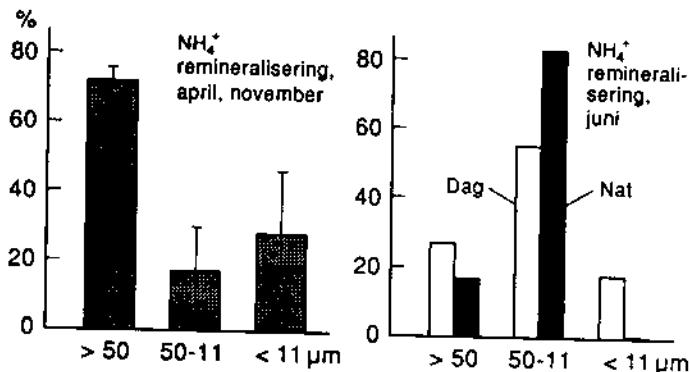
Primærproduktion og næringssaltoptagelse og remineralisering på station A i det sydøstlige Kattegat i 1988. Optagelsen af henholdsvis C, N og P er angivet i 25 og 10%-lysdybderne. Remineraliseringen viste ingen lysafhængighed.

i juni hvor remineraliseringsraten var meget lav trods høj temperatur.

Ubalance mellem remineralisering og optagelse

I modsætning til hvad man kunne forvente, var der kun ringe overensstemmelse mellem remineraliseringen og optagelsen af ammonium og fosfat. I gennemsnit svarede ammoniumoptagelsen til ca. 60 % af remineraliseringen, mens fosfatoptagelsen i gennemsnit var dobbelt så stor som remineraliseringen.

#### Sydøstlige Kattegat, 1988



**Figur 6**  
Ammoniumremineraliseringens fordeling på størrelsesfraktioner på station A i det sydøstlige Kattegat. Forsøgene blev gennemført i april, juni og september. Remineraliseringen i de enkelte fraktioner er angivet i procent af den totale remineralisering. Da tendensen var identisk april og november er værdierne fra disse to måneder midlet.

Under eutrofe forhold var store alger og store græssere dominerende

Remineraliseringens fordeling på størrelsesgrupper er undersøgt på 3 årstider: i april, juni og november (Figur 6). Under de eutrofe forhold i april og november med relativt høje næringsstofkoncentrationer og dominans af alger, var det primært dyr større end 50 µm, som var ansvarlig for remineraliseringen af ammonium, mens det i juni under de ekstremt

Under oligotrofe dominerede små alger og græssere oligotrofe forhold og med dominans af ultraplankton <6µm) var dyr mellem 11 og 50 µm, som var de vigtigste producenter af ammonium.

### 3.2.3

Nitratbaseret produktion størst om foråret

#### Nitratbaseret primærproduktion

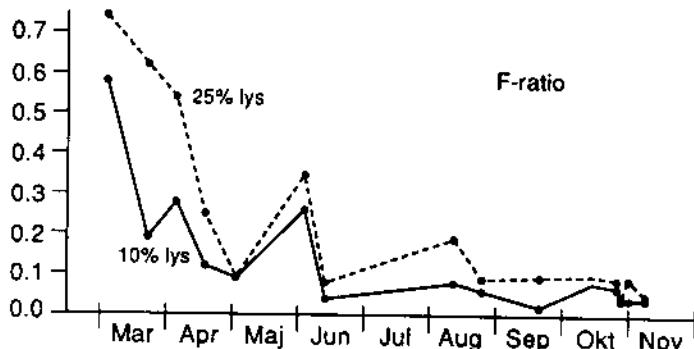
Planktonalgernes optag af nitrat var størst under forårmaksimaet samt ved prøvetagningen den 11. august (Figur 7). Den relative betydning af nitrat som kvalstofkilde for algernes vækst udtrykkes ofte ved

$$F = \frac{\text{nitratoptagelse}}{\text{nitrat-} + \text{ammoniumoptagelse}}$$

(Dugdale og Goering 1967). F var størst i begyndelsen af marts (hvor nitratkoncentrationen i vandet var høj), faldt indtil maj i takt med udtømningen af nitrat i vandet (se Figur 4B) og varierede derefter, når den 3. juni undtages, mellem 0.05-0.2 og 0.02-0.1 i henholdsvis 25 % og 10 % lys-dybden. Inden for prøvetagnings-perioden 7. marts - 12. november udgjorde den

Sydøstlige Kattegat, 1988

Figur 7  
Den nitratbaserede produktionens andel af den totale primærproduktion udtrykt ved F-forholdet.



nitratbaserede primærproduktion 18 % og 11 % af totalproduktionen i de to dybder. Hovedparten, 60-64 %, af den nitratbaserede primærproduktion lå i marts - april.

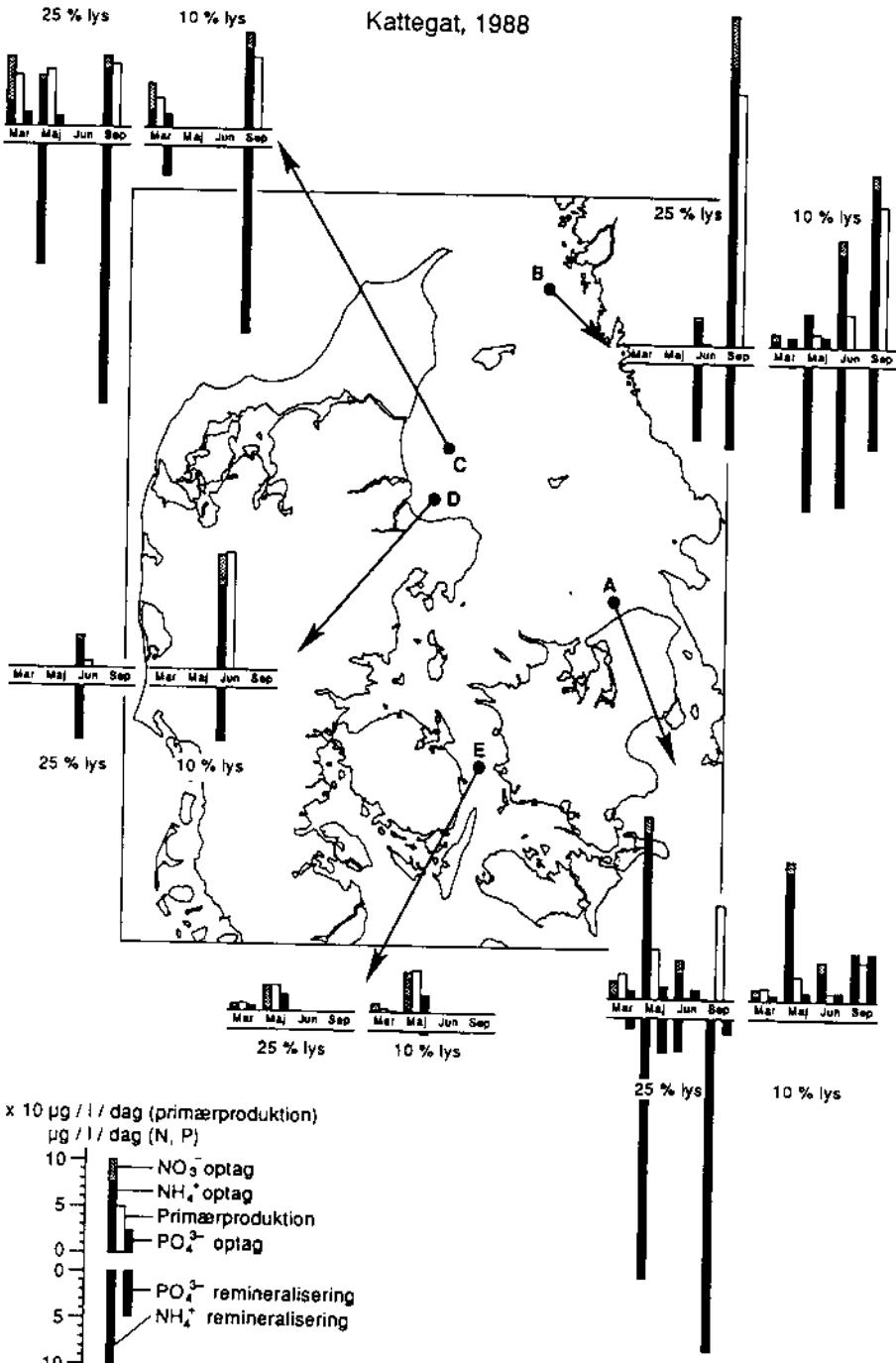
### 3.3 Øvrige Kattegat

Var station A repræsentativ for hele Kattegat?

Til belysning af i hvor høj grad overfladelaget i sydøstlige Kattegat er repræsentativt for hele Kattegat med hensyn til produktion og næringssaltomsætning gennemførtes undersøgelser på yderligere 3 stationer i Kattegat i marts, maj og september. Mønstret i næringssaltenes koncentration og fordeling på de tre stationer var i øjne overensstemmelse med forholdene i det sydøstlige Kattegat i samme periode. I begyndelsen af marts var primærproduktionen og næringssaltoptaget væsentligt højere i den lavvandede Ålborg Bugt (St. C) sammenlignet med det sydøstlige Kattegat, mens algernes vækst i Store Bælt (St. E) knapt var kommet i gang (Figur 8). I september var både koncentrationen af planktonalger, primærproduktionen og næringssaltenes optag væsentligt højere i det nordøstlige Kattegat (St. B) sammenlignet med de øvrige stationer.

Den nitratbaserede produktions andel høj i foråret og lav i sommermånederne

Den nitratbaserede primærproduktion udgjorde på de tre stationer 57-65 % i marts, 6-12 % i maj og 12-20 % i september. Ud fra de gennemførte undersøgelser må intensivstationen i det sydøstlige Kattegat anses for at være rimelig repræsentativ for større dele af Kattegat.



Figur 8

Primærproduktion og næringsaltoptagelse og -remineralisering på prøvetagningsstationerne i Kattegat i 1988. Optagelsen af henholdsvis C, N og P er angivet i 25 og 10%-lysdybderne. Remineraliseringen viste ingen lysafhængighed.

### 3.4 Chrysochromulina polylepis

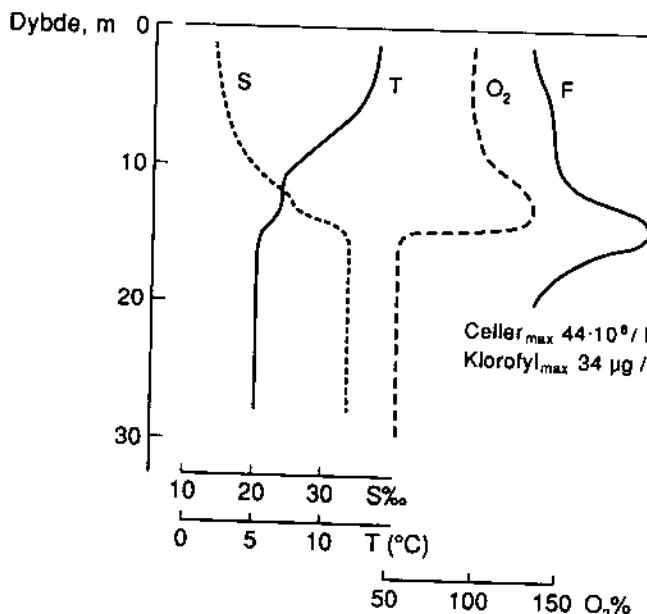
Hyppige klorofyl-maksima ved springlaget

Ved målingerne af fluorescensen i dybdeprofiler i Kattegat blev det klart, at en væsentlig del af planktonalgebiomassen på visse årstider findes i dybereliggende vandlag omkring salt-springlaget. Den massive forekomst af Chrysochromulina polylepis i maj og juni 1988 var et eksempel på dette.

Chrysochromulina  
konzentreret  
i springlaget

I slutningen af opblomstringen, hvor vore undersøgelser foregik, var det karakteristisk for hele Kattegat, at algerne var koncentreret

i et 0.5 til 2 meter tykt lag omkring salt-springlaget (Figur 9). Algebiomassen var her meget høj, (op til 55 µg klorofyl a/l), og den 6-10 µm store stilkalge C. polylepis altdominerende med celletal på op til 100 millioner celler/l (St. D). I de øvre vandlag var algebiomassen meget lav og do-



Figur 9

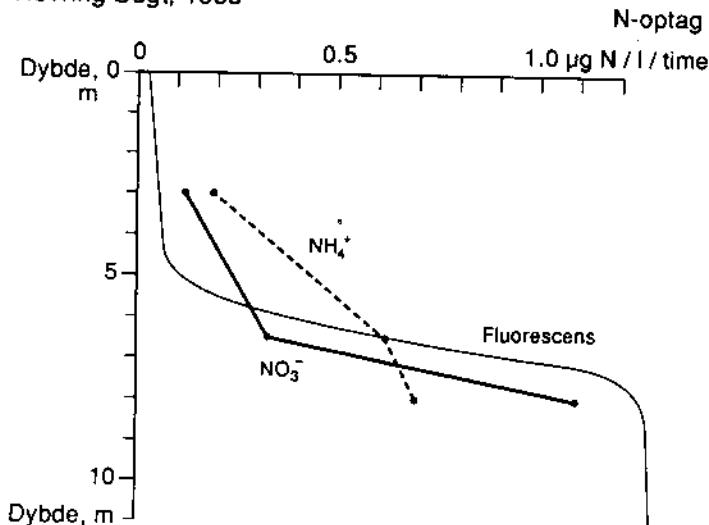
Typiske dybdeprofiler for salinitet (S), temperatur (T), iltmætning ( $O_2$ ) og fluorescens (F) under Chrysochromulina opblomstringen i Kattegat, 1988.

mineret af kiselalgen Skeletonema costatum. I alt udgjorde Chrysochromulina mellem 55 og 99 % af klorofyl-biomassen pr. kvadratmeter.

Sammenfaldende med den stigende Chrysochromulina biomasse steg kvalstofoptagelsen med dybden (Figur 10), og samme stigning kunne ses i primærproduktionen (ikke vist). Både koncentrationen af ammonium og nitrat øgedes med dybden, men nitrat blev tilsyneladende mere betydningsfuld som kvalstofkilde. F-forholdet var i

Figur 10  
Dybdeprofiler  
for kvalstofoptag  
og fluore  
scens målt i  
slutningen af  
Chrysochromulina  
opblomstringen i  
maj-juni 1988.  
Data fra station  
D i Hvirring Bugt  
nord for Djurs  
land.

Hvirring Bugt, 1988



Nitratbaserede  
produktion 60%

overfladen ca. 0.4 og steg til 0.6 i Chrysochromulina-laget.

Overmætning af  
ilt i algelaget

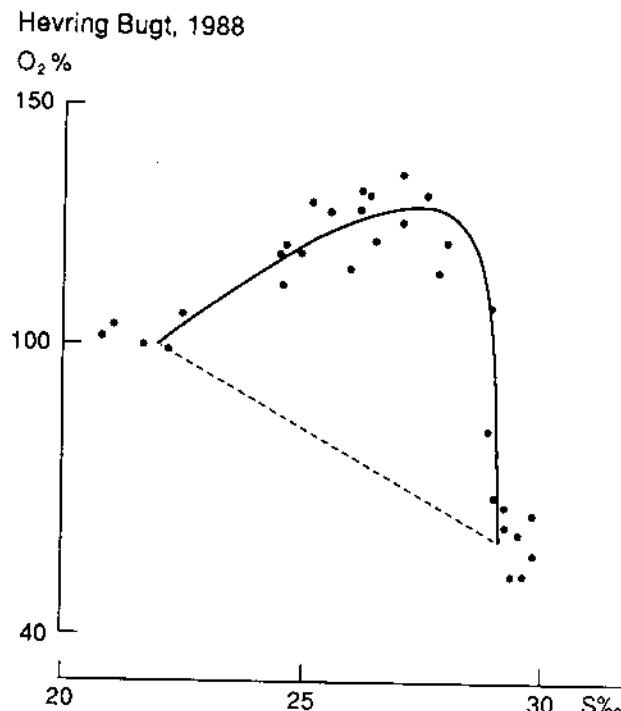
I Chrysochromulina-laget var der generelt en betydelig overmætning af ilt (op til 50%). Primærproduktionen på undersøgelsestidspunktet kunne ikke give så store overmætninger, og iltoverskuddet var derfor opbygget gennem en længere periode. Udfra relationen mellem

Minimumproduktion  
på ca. 1000 µgC/l

Næringssaltene  
tilført udefra

salinitet og ilt i algelaget (Figur 11) er det muligt at beregne minimumprimærproduktionen i den periode, hvor overmætningen er opbygget. På St. A og D var minimumproduktionen henholdsvis ca. 800 µg og 1100 µg C/l, svarende til et kvalstofferbrug på ca. 10-13 µmol pr. liter eller omkring 50 mmol pr. kvardratmeter. På grund af overmætningen kan dette kvalstof ikke være regenereret i algelaget (den heterotrofe aktivitet ville have forbrugt ilten), men må være tilført udefra. I betragtning af den store udbredelse af Chrysochromulina og den krævede kvalstofmængde må tilførslen være sket i form af nitrat.

Figur 11  
Salinitets-ilt  
diagram for sta-  
tion D i Hvirring  
Bugt nord for  
Djursland under  
Chrysochromulina  
opblomstringen i  
1988. Relationen  
er dannet ved  
brug af data fra  
dybdeprofiler  
målt over flere  
dage i starten  
af juni. Mini-  
mum-iltproduk-  
tionen under op-  
blomstringen er  
beregnet ved in-  
tegration under  
kurven. Iltfor-  
bruget er omreg-  
net til minimum-  
primærproduktion  
ved en omreg-  
ningsfaktor på  
0.4 mg C/ml O<sub>2</sub>.



Kvalstofkoncentrationerne i dette sene stadie  
af Chrysochromulina-opblomstringen var ikke be-

grænsende for produktionen.  $V_{max}/V_{amb}$  for ammonium lå mellem 1 og 1.5. I overfladelaget var der derimod tegn på kvalstofbegrensning med  $V_{max}/V_{amb}$  værdier på 2-3.

### 3.5 Vejle Fjord

#### 3.5.1

##### Hydrografi og vandkemiiske parametre

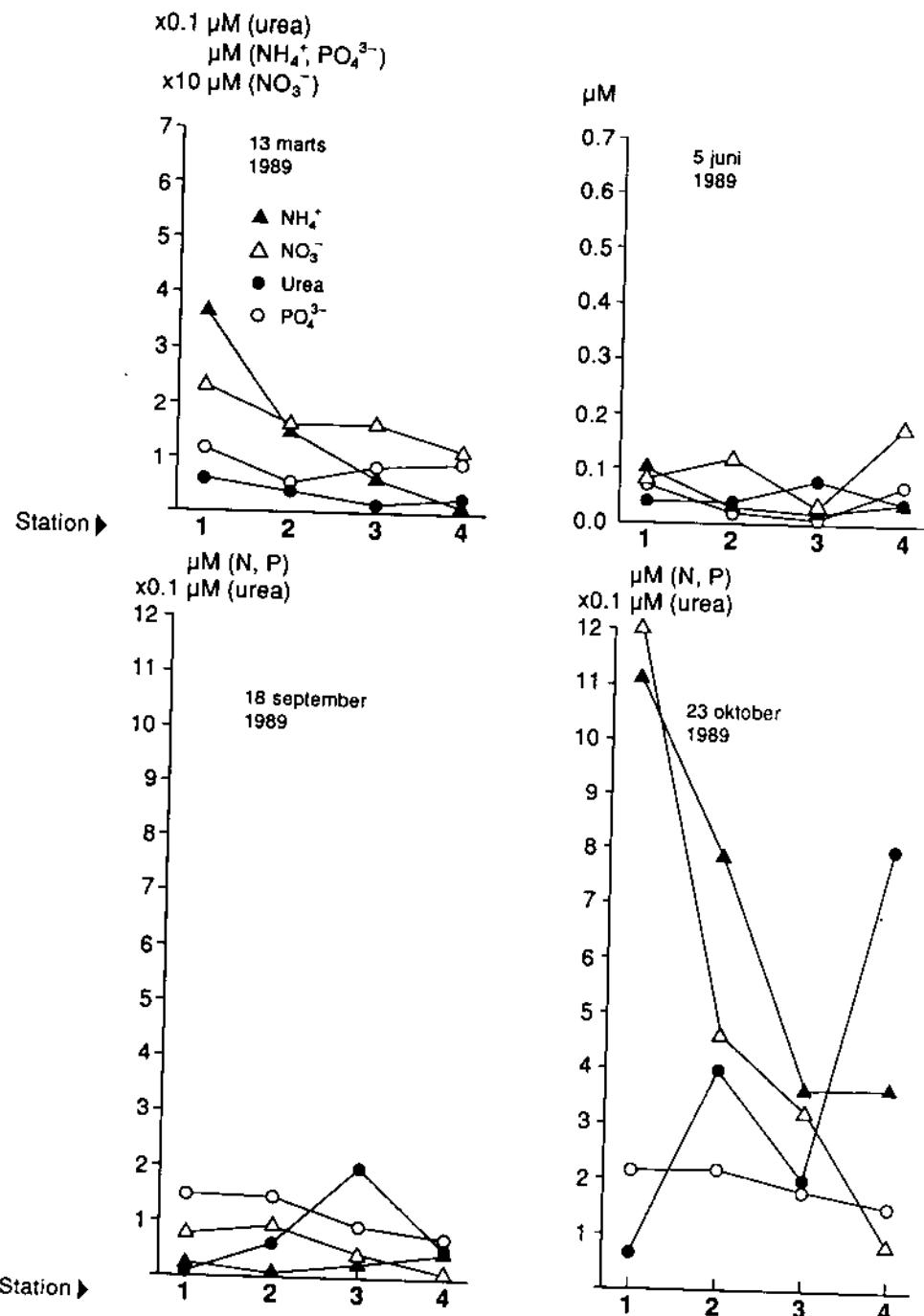
Saltholdigheden faldt fra ca. 21 °/oo i marts til et minimum på ca. 16 °/oo i juni, for igen at stige i efterårs månederne til et maksimum på ca. 23 °/oo i oktober. Temperaturen var lavest i marts (ca. 5°C) og højest i september (ca. 15°C). Under de enkelte prøvetagninger var variationen mellem stationerne lille både m.h.t. saltholdighed og temperatur.

Næringsaltkoncentrationerne høje i marts og oktober

Koncentrationen af næringsalte var høj i marts, forholdsvis lav i juni og stigende i efterårs-månederne september til oktober (Figur 12). De højeste kvalstofkoncentrationer var i marts og oktober, henholdsvis 12-22 og 4-11 µM. I marts udgjorde nitrat ca. 90 % af kvalstofnærings-saltpuljen og i oktober ca. 50 %. Ammonium- og fosfatkoncentrationerne var specielt høje i oktober. Ureakoncentrationerne var på alle tidspunkter lave dog med en minimal stigning i oktober. I marts og oktober viste fordelingen af næringssalte høje koncentrationer på de inderste stationer og faldende værdier ud af fjorden.

Sammenlignes koncentrationerne med den sædvanlige årstidvariation i Vejle Fjord (Vejle Amt 1989), fremgår det, at de valgte prøvetagnings-tidspunkter giver en god dækning af de næringsstofs situationer, der forekommer i fjorden i produktionsperioden.

Vejle Fjord, 1989



Figur 12

Koncentrationen af kvalstof- og fosfornærings-  
salte i 2.5 meters dybde på prøvetagningssta-  
tionerne i Vejle Fjord i marts, juni, september  
og oktober 1989.

Algeoplomstring  
i september

Planteplanktonbiomassen, målt som klorofyl-koncentrationen (Tabel 1), var højest på St. 2 og 3 i september. Dette faldt sammen med en opblomstring af Prorocentrum minimum.

Generelt var klorofylkoncentrationen lavere på St. 1 end på de ydre stationer.

Tabel 1

Planteplanktonbiomassen i 2.5 meters dybde på de fire undersøgesstationer i Vejle Fjord 1989. Biomassen er udtrykt som µg klorofyl a/l (i.m. = ikke målt).

Dato	Station			
	1	2	3	4
13.3.89	6.8	8.5	9.6	8.4
5.6.89	5.0	9.7	9.9	8.8
18.9.89	8.2	28.1	12.0	i.m
23.10.89	4.6	4.6	12.6	7.1

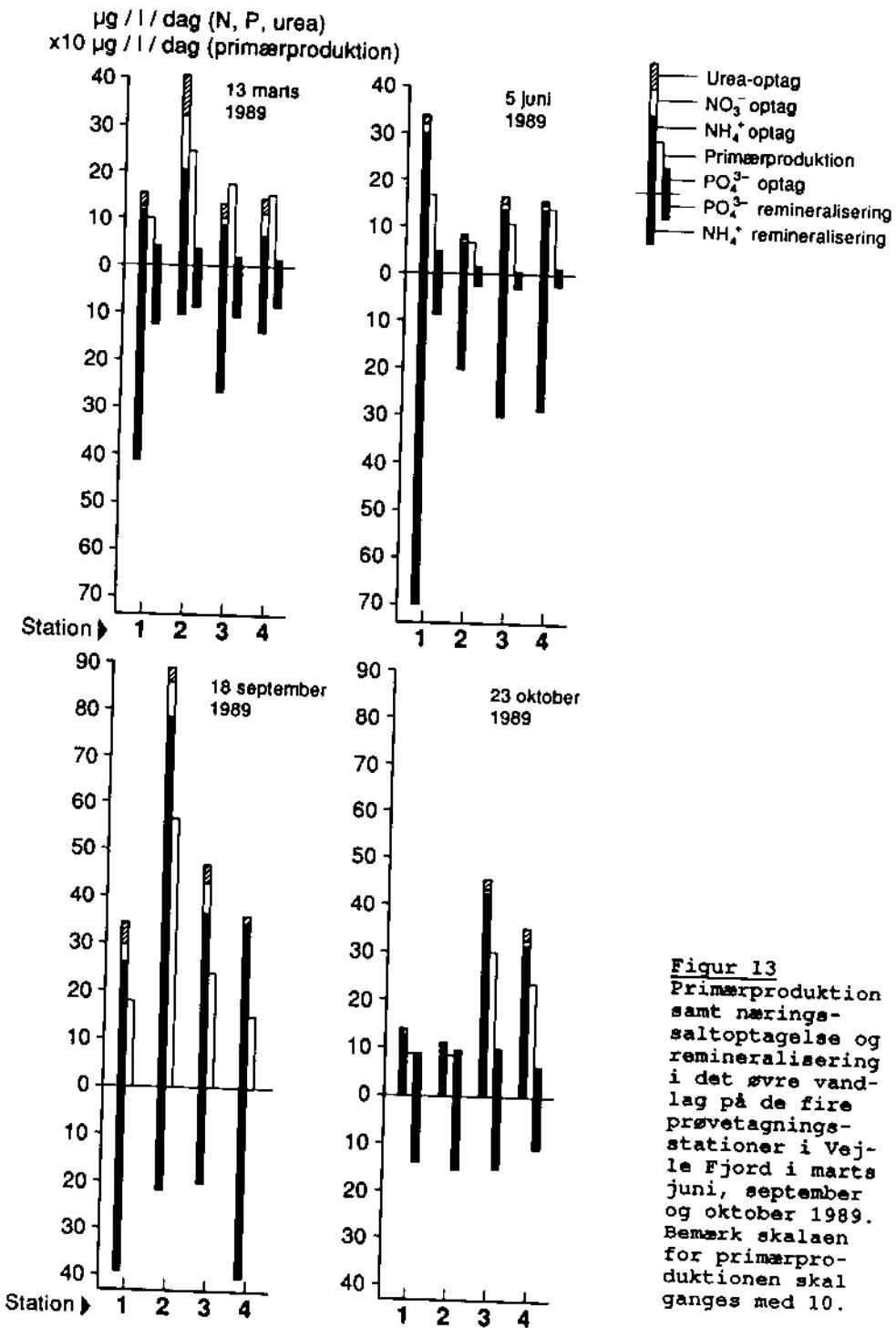
3.5.2

Høj primærproduktion og næringsstofoptagelse i september

Næringssaltoptag og -remineralisering

Den højeste primærproduktion og næringssaltoptagelse blev målt i september sammenfaldende med den massive opblomstring af Prorocentrum minimum (Figur 13). Algekoncentrationen og kulstof- og næringssaltoptagelsen var særlig høj på station 2, hvor der også var en relativt højere kvælstofkoncentration. På alle stationer var koncentrationen af opløst fosfat høj i forhold til kvælstofkoncentrationen. (sammenlignet med Redfield forholdet).

Vejle Fjord, 1989



**Figur 13**  
Primærproduktion  
samt nærings-  
saltoptagelse og  
remineralisering  
i det svre vand-  
lag på de fire  
prøvetagnings-  
stationer i Viej-  
le Fjord i marts  
juni, september  
og oktober 1989.  
Bemerk skalaen  
for primærpro-  
duktonen skal  
ganges med 10.

*Prorocentrum minimum* var stadig talrig i oktober på St. 3. Klorofylkoncentrationen var her 12 µg px. liter med tilsvarende høj primærproduktion og kvalstofoptag. På de 2 inderste stationer var algebiomassen og primærproduktionen lav på trods af høje næringsstofkoncentrationer.

Balance i optagelsen af kvalstof og kulstof

C:N-forholdet for optagelsen lå ved alle prævetagninger omkring Redfields ratio (6.6) og varierede mellem 4.2 og 12.8.

Remineraliseringen af ammonium og fosfat var i de fleste tilfælde større end optaget. Kun i september, under opblomstringen af *Prorocentrum minimum*, oversteg ammoniumoptagelsen remineraliseringen.

### 3.5.3

#### Kvalstofforbindelsernes betydning

De reducerede kvalstofforbindelser ammonium og urea havde størst betydning, idet de dækkede 63-98 % af kvalstofforbruget. Ureaoptaget udgjorde heraf 4-23 %, med den højeste andel i marts.

Nitratbaseret produktion størst betydning i juni

Optagelsen af nitrat var altid lav (F-forholdet varierede mellem 0.02-0.37). Størst betydning havde nitrat på Stationerne 2 og 3 i marts og St. 1 i juni (0.29-0.39). De laveste F-forhold blev målt i oktober, hvor nitratkonzcentrationerne var relativt høje (3-12 µM på de 3 inderste stationer), men hvor nitratoptagelsen blev "hæmmet" af de høje ammoniumkonzcentrationer (4-11 µM).

### 3.6 Næringsaltbegrænsning

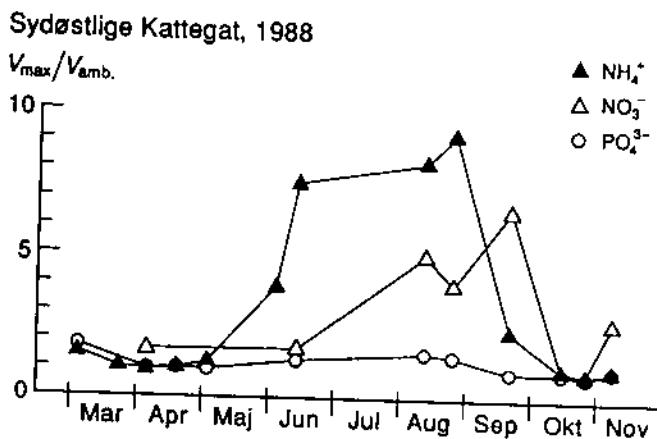
#### 3.6.1

Kvælstofunderskud sommer og tidligt efterår

##### Sydøstlige Kattegat

Vurderet på baggrund af forholdet  $V_{max}/V_{amb}$  visste planktonalgerne tydelige tegn på kvælstofmangel i sommer- og efterårs månederne. Der var således en betydelig stimulering i optagelsen af både ammonium og nitrat efter berigelse med disse næringsalte ( $V_{max}/V_{amb} > 4$ ) fra juni til september (Figur 14). Fosfatberigelse gav derimod kun i enkelte tilfælde en svag øgning i P-optagelsesrate (Figur 14) og  $V_{max}/V_{amb}$  kom aldrig op på en fordobling af optagelsesrate.

**Figur 14**  
Variationen i forholdet mellem den maksimale optagelsesrate ( $V_{max}$ ) og den aktuelle optagelsesrate ( $V_{amb}$ ) på station A i det sydøstlige Kattegat i 1988. Værdier over 4 indikerer underskud af det pågældende næringssstof (kvælstof respektivt fosfor).

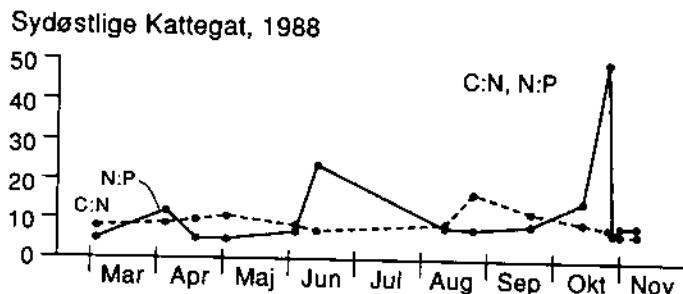


Andre indicier på næringssaltbegrænsning var ikke entydige. Forholdet mellem opløst kvælstof- og fosfornæringsalte angav generelt et overskud af fosfat hele 1988 (Tabel 2A), mens N:P-forhold i den partikulære fase lå tæt på, hvad man regner for at være ideelt for fytoplankton, nemlig 7:1 (vægtbasis) (Redfield 1958, Rhee 1982) (Figur 15). I enkelte tilfælde (4. april, 13. juni og 25. oktober) var det partikulære N:P forhold meget højt og tydede

der ved på P-underskud i det partikulære materiale, dog uden at der var andre indicier på P-mangel.

C:N-forholdet i det partikulære materiale (Figur 15) viste svagt tegn på kvælstofmangel i slutningen af august (C:N=12) men gav ellers ingen antydning af kvælstofbegrænsning (varierede mellem 6 og 10).

**Figur 15**  
Årstidsvariatio-  
nen i forholdet  
mellem partiku-  
lært kulstof og  
kvælstof samt  
kvælstof og fos-  
for på station A  
i det sydøstlige  
Kattegat i 1988.



Berigelsesforsøgene viste ingen entydige tegn på næringsaltbegrænsning (Tabel 2B og C). Berigelse med  $\text{NH}_4^+$  i lys gav ikke anledning til øgning i primærproduktionen, og undertrykte denne svagt i enkelte tilfælde (13. juni og 20. september). Primærproduktionen var ligeledes upåvirket efter berigelse med henholdsvis  $\text{NO}_3^-$  og  $\text{PO}_4^{3-}$ . Ammonium Enhancement Ratioen (kulstofindbygning i mørke, Tabel 2C) lå hele året omkring 1.0.

Fosfatase aktiviteten var meget lav gennem hele 1988 i det sydøstlige Kattegat (Tabel 2D) og antyder på intet tidspunkt P-mangel hos algerne.

### 3.6.2

Kvalstofunderskud  
juni og september

Både kvalstof- og  
fosforunderskud i  
juni

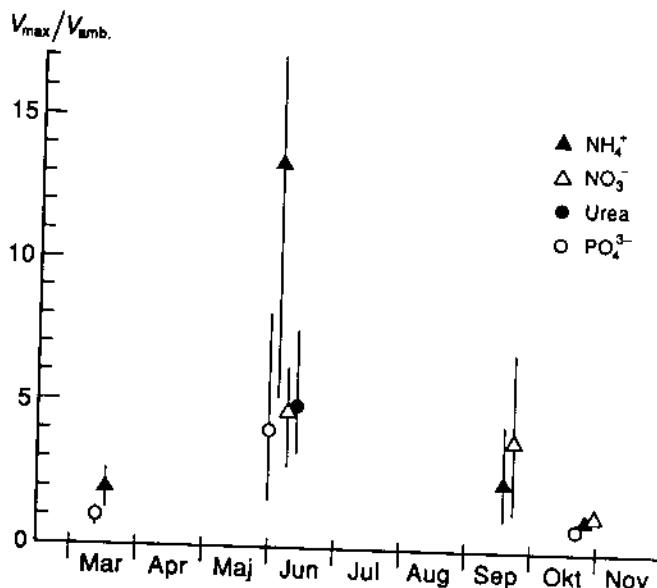
### Vejle Fjord

Også i Vejle Fjord indikerede  $V_{max}/V_{amb}$  forholdet tydeligt kvalstofbegrænsning i sommermånederne juni og september (Figur 16).

Specielt i juni var forholdet meget højt ved ammoniumberigelse, men nitrat-, urea- og fosfat tilsetning stimulerede ligeledes næringsstofoptagelsen. Der var således i juni indikation på at både kvalstof og fosfat var i underskud, dog virkede kvalstofmanglen mest udtalt.

**Figur 16**  
Variationen i  
forholdet mellem  
den maksimale  
optagelsesrate  
( $V_{max}$ ) og den  
aktuuelle opta-  
gelsesrate  
( $V_{amb}$ ) på de fi-  
re prøvetag-  
ningsstationer i  
Vejle Fjord i  
1989.

Vejle Fjord, 1989



Forholdene mellem C, N og P i det partikulære  
material, berigelsens indflydelse på primær-  
produktionen og alkalisk fosfatase aktivitet  
gav heller ikke i Vejle Fjord entydige tegn på  
næringsaltbegrænsning.

#### 4. Diskussion

Mange faktorer har  
indflydelse på  
næringsstofoptaget

Det er velkendt fra litteraturen, at plankton-algernes næringsstofoptagelse er afhængig af en lang række faktorer, så som deres biomasse, vækst og artssammensætning, samt lysintensiteten og koncentrationen og fordelingen af næringssaltspecier (kvalstof). Ligeledes varierer optagelsen gennem døgnet (Paasche 1988). Disse forhold vil i principippet være unikke for den enkelte situation og det nødvendiggør, at man før at udregne rater på døgnbasis må etablere entydige sammenhænge mellem de betydnende variable og næringsstofoptagelsen. Denne ekstra arbejdsindsats er årsagen til, at der i litteraturen er en udtalt mangel på data repræsenterede døgnværdier (Paasche 1988), og at næringssringsoptag og primærproduktion i de relativt få arbejder, hvor raterne er bestemt samtidigt, i reglen ligger langt fra algernes teoretiske behov (Fisher et al. 1982, Paasche 1988).

##### 4.1 Balancen mellem C, N og P optag

Ubalance i C, N  
og P optaget i  
Kattegat

Ved beregningen af døgnværdier i den her beskrevne undersøgelse har vi uddover de ovennævnte forhold også taget hensyn til stimulering af N-optag ved tilsmættning af kvalstofsalte (Michaelis-Menten kinetik) og isotopfortynding som følge af remineralisering under inkubationerne. På trods heraf var der ofte ubalance i optagelsen af uorganisk kulstof, kvalstof og fosfor i Kattegat resulterende i lave C:N og C:P forhold; mest udtalt var dette i juni. En mulig forklaring på de relativt lave optagel-

Bakterier kan  
spille en rolle

sesforhold på dette tidspunkt kan være en betydende bakteriel optagelse af ammonium og fosfat. I juni var overfladelaget ekstrem oligotroft (Figur 4B), og den lave remineraliseringsrate i fraktionen mindre end 11 µm (Figur 6) kan være udtryk for et underskud af kvalstof og fosfor i bakteriernes kulstofsubstrat (opløst organisk stof). Dette underskud kan bakterierne dække ved optagelse af ammonium og fosfat (Fenchel 1988).

Balance i C, N  
og P optaget i  
Vejle Fjord

Under de langt mere eutrofe forhold i Vejle Fjord var primærproduktion, og optagelse af kvalstof og fosfor generelt i overensstemmelse med Redfield-forholdet.

#### 4.2. Næringssaltoptag og remineralisering

##### 4.2.1

Relative betydning  
af kvalstofspecier  
varierer med dyb-  
den og årstiden

##### Kattegat

I Kattegat er primærproduktionen baseret dels på nitrat dels på ammonium (undersøgelser i 1989 har vist at ureas betydning som algenæringsstof i Kattegat om sommeren er af samme eller af mindre betydning end nitrat). Den relative betydning af de to uorganiske kvalstofspecier varierer både med dybden (= lyset) og årstiden.

FORÅR  
Forårsproduktionen  
baseret på nitrat

I det tidlige forår er nitrat, som er akkumuleret gennem vinteren i overfladelaget, den vigtigste kvalstofkilde for planktonalgernes vækst (Figur 7). I takt med opbygningen af planktonalgebiomassen i marts-april udømmes vandets nitratpulje. I Figur 17 er nitratoptagelsen for perioden 22. marts - 2. maj opgjort til 105 og 47 µg nitrat-N/l (= 7.5 og 3.5 µM nitrat-N) for 25 % og 10 % lys dybden. Dette forbrug svarer næje til det observerede

Nitratpuljen  
opbruges

fald i vandets koncentration af nitrat (Figur 4B).

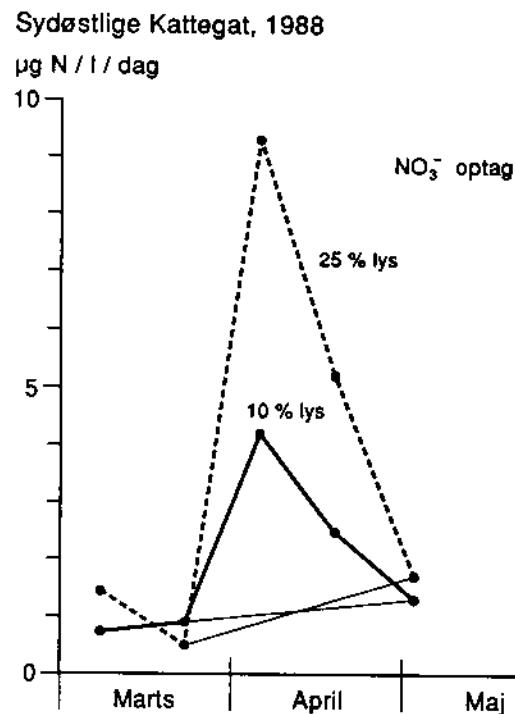
En del af forårsproduktionen remineraliseres

Ammoniums betydning øges

Udsynkning af næringssaltene

En del af forårsproduktionen remineraliseres i vandssjøen og allerede når algebiomassen er maksimal (den 5. april), er ammonium-N lige så betydningsfuldt som nitrat-N. Forårets koncentration af græssere, som kan konsumere de relativt store kiselalger, er dog lav, og næringssstofferne kan derfor ikke effektivt fastholdes i den fotiske zone, men sedimenterer ud sammen med algerne (Smetacek og Pollehn 1986).

**Figur 17**  
Nitratoptagelsen i forårmånederne på station A i det sydøstlige Kattegat. Det totale forbrug af nitrat er beregnet ved at integrere under kurven fra slutningen af marts til starten af maj.



#### SOMMER

Tabet af næringssstoffer fra den fotiske zone om foråret og det løbende sedimentationstab gennem resten af produktionsperioden erstattes med næringssalte tilført dels fra bundlaget (ved

Ny tilførsel af næringssalte om sommeren

turbulent diffusion og vindinduceret nedbrydning af skillefladen og efterfølgende erosion ned i det nærigsrige bundlag) dels ved advektiv transport, f.eks. fra fjorde, samt atmosfærisk deposition.

Opadrettet trans-  
port

Den vindinducerede opadrettede transport er i sagens natur episodisk og de tilførte næringssalte (primært nitrat og fosfat) opbruges hurtigt. Primerproduktionen vil i løbet af kort tid igen helt være baseret på regenererede næringssalte. Teoretiske beregninger har vist at denne opadrettede transport af næringssalte på årsbasis er meget betydningsfuld i Kattegat (Rydberg og Sundberg, 1986).

Lav vindaktivitet  
- ingen opadrettet  
transport

I maj-juni 1988 var vindaktiviteten lav (som det generelt er tilfaldet på denne årstid), og lagdelingen af vandmasserne var i 1988 maksimal, i perioder med etablering af et sekundært saltspringlag. Dette hindrede en vertikal tilførsel af næringssalte til overfladelaget og algernes absolute aktivitet var her minimal (Figur 5).

Episodisk opad-  
rettet transport

Blæsevejr i perioden inden prøvetagningen i august har sandsynligvis medført en erosion ned i det nærigsrige bundlag som igen har ført til en høj primerproduktion baseret på nyt tilførte næringssalte. Den 11. august, havde nitrat stadig en stor betydning sammenlignet med de øvrige sommerværdier, men hovedparten af produktionen indgik nu i det regenererende system. Hvor stor en del af den nye produktion, der optages i det regenerende system, og hvor stor en andel, der synker ud af den produktive zone, efter vindinduceret opblanding vil bl.a. afhænge af græssenes antal og aktivitet, vandets turbulens i den efterfølgende periode o.s.v.. Der foreligger dog ikke undersøgelser, som kan belyse dette nærmere.

EFTERÅR	I slutningen af oktober og i begyndelsen af november var vindaktiviteten og dermed den opadrettede transport af næringssalte betydelig. Koncentrationen af nitrat i overfladen var stigende, men den samtidige forekomst af ammonium i høje koncentrationer "hæmmede" algernes udnyttelse af nitrat. Det homogene "overfladelag" var i denne periode udstrakt til 18-26 m dybde. Lysintensiteten har derfor antagelig været så lav, at heterotrofe processer har domineret. Dette understøttes dels af faldet i partikulært bundet kvalstof dels af de meget høje ammoniumkoncentrationer.
Næringsaltene tilbageholdes og recykles mange gange om sommeren	Primerproduktionen gennem sommeren (og efteråret) var i helt overvejende grad baseret på næringssalte regenereret i den fotiske zone. Tilbageholdelsen eller recyklingen af næringssalte i den fotiske zone var meget effektiv. Den lave F-ratio (ca. 0.1) betød at næringssaltene recykledes mange gange ( $1-F/F = 9$ ; Eppley og Peterson 1979) inden udsynkning fra den fotiske zone.
Laholm Bugten	Den kvalitative fordeling af kvalstofnæringsaltenes betydning gennem året i Kattegat bekræftet tidligere undersøgelser gennemført i Laholm Bugten i det sydøstlige Kattegat i 1982-1986 (Sahlsten et al. 1988). I disse undersøgelser blev den nitratbaserede årsproduktion opgjort til 25 % mod i denne undersøgelse til 18 % og 11% for de to dybder, henholdsvis. Forskellen kan bero på en større tilførsel af nitrat fra land i Laholm Bugten; men også forskellig forsøgs- og beregningsteknikker bl.a. hensyntagen til isotopfortynding under inkubationen, nitratoptagelsens lysafhængighed ect. kan være medvirkende årsag til forskellene.

#### 4.2.2

Ammonium vigtigst  
for produktionen

Store tilførsler  
af ammonium fra  
land

og bund

#### Vejle Fjord

I Vejle Fjord var de reducerede kvalstofforbindelser, primært ammonium, altid dominerende i algernes kvalstofoptag. I marts og oktober med en samtidig forekomst af både ammonium og nitrat i høj koncentration, "hæmmedes" algernes nitratoptagelse, et forhold der også kendes fra andre kystnære områder (McCarthy et al. 1977, Garside 1981). Det oprindelig koncept, at nyproduktion alene er baseret på oxideret kvalstof og regenererer produktion på reducerede forbindelser, lader sig ikke umiddelbart anvende i et område som Vejle Fjord. Her viser den tydelige gradient i ammoniumkoncentrationen gennem fjorden, at der tilføres betydelige mængder reducerede kvalstofforbindelser fra land. Udnyttelse af denne ressource repræsenterer ny-produktion.

Ligeledes betyder den lavvandede og ikke lagdelte vandsøjle, at ammonium og fosfat, remineraliseret i sedimentet og udskilt af makrofaunaen knyttet hertil, let gøres tilgængelig for algeplanktonet. Et eksempel på dette synes demonstreret i september, hvor der på St. 2 (og St. 3) var en massiv opblomstring af Prorocentrum minimum. Som det eneste tilfælde under undersøgelsen i Vejle Fjord var remineraliseringen (og dermed græsningen) i vandet meget lavere end ammoniumoptagelsen, (et forhold som selv-følgelig er nødvendig for opbygning af en stor algebiomasse). De meget lave koncentrationer af ammonium både inderst og yderst i fjorden taler imod en advektiv tilførsel. Den nødvendige ammonium må således komme fra bunden.

Udfra de målte optagelses- og remineraliseringsrater af ammonium og algernes koncentration (beregnet ved fluorocensprofilen) kan den nødvendige mængde ammonium opgøres til 6-7 mmol

$\text{NH}_4^-\text{N}/\text{m}^2/\text{d}$ . Dette er omkring en størrelsesorden højere end den maksimalt målte frigivelse af ammonium fra sedimentet i Århus Bugt (Sørensen og Jensen 1990) og peger derfor på, at den benthiske makrofauna må være ansvarlig for ammoniumproduktionen.

#### 4.2.3

##### Balancen mellem optag og remineralisering

I den fotiske zone i åbne havområder er der generelt ligevægt mellem planktonalgenes optag og den heterotrofe remineralisering af ammonium fosfat. (f.eks. Harrison et al. 1983). Dette var kun sjældent tilfældet ved forsøgene i Kattegat (Figur 5 og 8). Her oversteg remineraliseringensraten for ammonium i næsten alle tilfælde optagelsen, i gennemsnit med 67 %. Ubalancen mellem optag og remineralisering var størst i efteråret og i denne periode kunne der også iagttages en markant øgning i koncentrationen af opløst ammonium. Kvantitativt svarede denne øgning dog langt fra til "overskudsproduktionen" af ammonium. Ligeledes mener vi ikke, at nitrifikation er en betydende "sink" for ammonium selv om nye undersøgelser har vist, at denne selv i den fotiske zone er langt større end hidtil antaget (Ward et al. 1989). I så fald skulle koncentrationerne af nitrat eller nitratoptagelsen være markant stigende, hvilket ikke var tilfældet. En stress-induceret forsøgt ammoniumudskillelse hos de heterotrofe organismer under inkubationen kan ikke udelukkes, men det støttes dog ikke af fosfatudskillelsen. Denne var varierende både højere og lavere end fosfatoptagelsen. Den konsekvent større produktion af ammonium sammenlignet med optaget må således bero på metodiske problemer. Andre undersøgelser i Kat-

Ikke ligevægt  
mellem reminera-  
lisering og op-  
tag

En "sink" ?

Stress ?

Metodiske proble-  
mer

tegat har dog også vist høje remineralise-  
ringsrater sammenlignet med optagelsen af ammo-  
nium (Selmer 1988).

Rumlig og tidsmæssig afkobling af remineralisering og optagelse

I et lavvandet, kystnært område som Vejle Fjord, med betydelige tilledninger af både organiske og uorganiske næringsstofferbindelser, vil man ikke umiddelbart forvente en tæt kobling mellem remineraliseringen og forbruget af ammonium og fosfat i vandsøjen. Med undtagelse af station 4 var vandsøjen homogen på stationerne, og afhængig af turbulensforholdene kan næringssalte remineraliseret i sedimentet, derfor umiddelbart gøres tilgængelige for planktonalgerne. Resuspensionshændelser kan desuden bringe bundens mikrobielle remineralisering op i vandsøjen. Dette sammen med landbaserede tilførsler af både reducerede og oksiderede kvælstofnæringsalte, fosfat og organisk stof, kan give sig udtryk i stærkt varierende og markante ubalancer mellem pelagisk produktion og forbrug af ammonium og fosfat (se Figur 13).

#### 4.3 Chrysochromulina-opblomstringen

Stabile, lagdelte vandmasser  
Høj indstråling

Stor lysnedstrømning

Næringsaltene tilført ved advektiv transport

Opblomstringen af Chrysochromulina i Kattegat i 1988 har mange ligheds punkter med udviklingen af springlagsmaksima i andre marine områder, idet den forekom i en periode med meget stabile og lagdelte vandmasser, høj indstråling og lav algebiomasse i overfladen (Banse 1987). Opblomstringen afveg imidlertid fra det gængse koncept for udvikling af springlagsmaksima i måden de nødvendige næringssalte blev tilført på. De rolige vejrforhold før og under opblomstringen, (Rosenvørn 1989), som gav stabile og lagdelte vandmasser, betød også at en tilførsel af den nødvendige størrelse (minimum 50 mmol N pr. m<sup>2</sup>) ikke kunne ske ved opadrettet transport fra de næringsrige bundlag som almindeligt for spring-

lagamaksima. Dette underbygges af iltprofilerne (Figur 9) og af salinitets- og temperaturdybdeprofilerne. Sidstnævnte indikerede ofte et vandlag ved skillefladen, der med den givne salinitet og temperatur ikke var dannet ved simpel blanding mellem overflade- og bundvand, og derfor har været induceret fra andre dele af Kattegat. Sandsynligvis har dette tilkomne vand indeholdt tilstrækkelige mængder af nitrat og fosfat til væksten af *Chrysochromulina*.

Hvad betyder springlagsmaksima for næringssalt-omsætningen ?

Uanset næringssaltdynamikken viste *Chrysochromulina* opblomstringen og den hyppige forekomst af springlagsmaksima i det hele taget, at processerne i og omkring springlaget må inddrages for at opnå en fuld forståelse af næringssaltdynamikken i de åbne havområder og af årsags-sammenhængen mellem algeopblomstringer og næringssalttilførsler. Indenfor rammerne af det her beskrevne projekt har det ikke været muligt, men problemet er inddraget i en efterfølgende undersøgelse i Havforskningsprogram-90 regi.

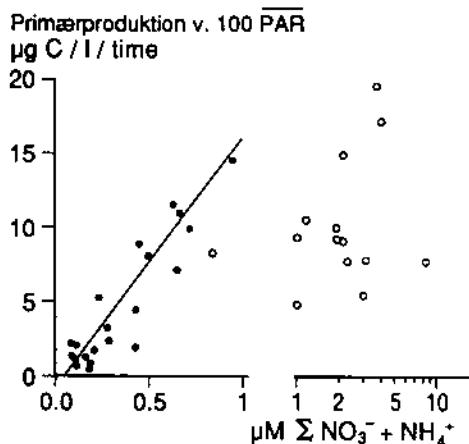
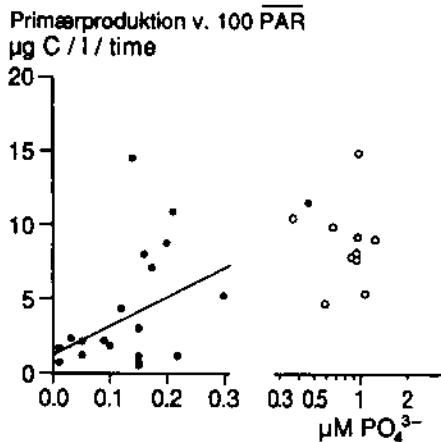
#### 4.4 Produktionsstyrrende faktorer

Koncentrationen af algeplankton i havet er til enhver tid bestemt af algernes vækstrate og størrelsen af tabsprocesser, så som græsning og udsynkning. Algecellernes vækstrate er styret af en lang række fysisk/kemiske faktorer, hvor lysintensiteten og næringssstofferne er de vigtigste, mens tabsprocesserne især er korreleret til grassernes aktivitet og turbulensforhold i vandet. Med baggrund i resultaterne fra de udførte inkubationer har vi udført korrelationsanalyser af både algernes biomasse, deres primærproduktion og produktivitet (produktion pr.

Korrelationen mellem primærproduktion og nærings-saltkoncentratio-  
ner i Kattegat

biomasseenhed) mod næringssaltenes koncen-tration. For Kattegat var primærproduktionen (normaliseret til en lysintensitet på  $100 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) i perioden med N-mangel i algerne (maj-september) stærkt korreleret til koncen-trationen af opløste kvalstofnæringsalte ( $p = 0.004$ ) og svagere til koncentrationen af fosfat ( $p = 0.055$ ) (Spearman Rank Correlation test). Sammenhængen mellem primærproduktionen og op-løste N var tydeligvis lineær (Figur 18). Det var ikke muligt at udføre en lineær regres-sionsanalyse, da næringssaltværdierne ikke var normalfordelte. Korrelationen mellem kvalstof-næringsalte og algernes biomasse og specif-ke produktion (pr. klorofyl enhed) var mindre entydig, måske på grund af usikkerhed ved be-stemmelse af de lave klorofylkoncentrationer ( $0.3-1 \mu\text{g/l}$ ).

#### Kattegat, 1988



Figur 18

Primærproduktionen i Kattegat i 1988 som funktion af kvalstof- og fosforkoncentrationen. Primærproduktionen er normaliseret til 100 PAR (i  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Regressionslinien er baseret på værdier fra maj-september. Værdierne er indikeret med lukkede symboler, mens åbne symboler indikerer værdier fra marts-april og oktober-novem-ber. (Spearman Rank Correlation coefficients N: 0.81, p = 0.004, P: 0.44, p = 0.055).

Disse simple analyser viser, at det i de næringssattige perioder er kvalstof, som kontrollerer størrelsen af primærproduktionen. I mere eutrofe perioder, det vil sige om foråret og efteråret, når koncentrationen af kvalstof-næringsaltalte er højere end 1  $\mu\text{M}$ , er det andre forhold og processer, som styrer biomasse og produktion af planktonalger (lys, græsning, sedimentation).

Korrelationen  
mellem primærpro-  
duktion og næ-  
ringssaltkoncen-  
trationer i  
Vejle Fjord

I Vejle Fjord var primærproduktionen i juni og september, hvor der var indicier på N-mangel i algerne, signifikant korreleret til både fosfat og opløste kvalstofnæringsaltalte (Spearkman Rank Correlation test). Grundet en begrænset data-mængde og en stor grad af autokorrelation mellem kvalstof- og fosfornæringsaltkoncentrationerne er det ikke muligt at afgøre hvilket af næringssaltene som primært styrer primærproduktionen.

#### 4.4.1

$V_{\max}/V_{amb}$  indiker-  
ede kvalstofunder-  
skud om sommeren

#### Næringssaltbegrensning

Kvalstofs betydning for primærproduktionen i sommermånederne underbygges af forholdet  $V_{\max}/V_{amb}$ , der indicerer en tydelig fysiologisk kvalstofbegrensning for algerne i Kattegat og Vejle Fjord (figur 14).

Samtidig kvalstof  
og fosforbegrens-  
ning i juni i  
Vejle Fjord

I Vejle Fjord var der i juni indicium for at der samtidigt var fosforbegrensning for algerne (figur 14). Dette underbygges af de meget lave fosfatkoncentrationer i juni (figur 12).

Det har været fremført at høje  $V_{\max}$ -værdier for fosfor kan være udtryk for luksusoptagelse hos fosformættede alger (f.eks. i Cembella et al. 1984), men ifølge Vincent (1981) og Cembella et al. (1984) forekommer luksus-fosforoptagelse kun hos fosforbegrensede alger.

At kvalstof- og fosforbegrensning optræder samtidigt kan forklares ved forekomst af algerarter med forskellige behov for kvalstof og fosfor således, at nogle arter er kvalstofbegrenede og andre fosforbegrenede (Sakshaug og Olsen 1986).

N:P forholdet i vandet underbygger kvalstofs betydning

Det lave N:P-forhold i opløste næringssalte underbygger, at kvalstof er begrænsende for produktionen i sommermånedene. Forholdet skal dog tages med forbehold, da det er udtryk for en øjeblikssituation og ikke tager hensyn til de aktuelle tilførsels- og optagelsesrater. Forholdet skal derfor nærmere tages som udtryk for, at fosfor ikke var begrænsende, idet omsetningsraten for fosfor normalt er hurtigere end for kvalstof (Garber 1984).

Den manglende indikation af næringssaltbegrensning ved brug af pulje- og primærproduktionsindeks er hverken ukendt eller overraskende. Udover, at algerne i sig selv udviser et bredt spektrum af partikulære N:P og C:N forhold selv under næringssatte forhold, vil forholdets anvendelighed påvirkes af mængden af heterotrofe organismer og detritus. Heterotrofe organismer og detritus har anderledes C:N og N:P forhold (Parson 1975, Garber 1984) og er rent metodisk er vanskeligt at adskille fra algerne.

Det partikulære N:P og C:N forhold

Primærproduktionen

At det ikke var muligt at påvise næringssaltbegrensning ved måling af primærproduktionen kan skyldes inkubationstiderne. Hemning af primærproduktionen ved ammonium-, nitrat- eller fosfattilsætning til næringssaltbegrenede populationer kan indtræde i et tidsrum fra få timer til mere end et døgn efter berigelsen (Collos 1986), og hvor en forøgelse af produktionen er påvist, har inkubationstiderne været meget lange. Vi har valgt ikke at inddrage langtidsforsøg, da muligheden for ændringer af

planktonksamfundet er meget store, og det er umuligt at opgøre om eventuelle ændringer er udtryk for et in situ potentiale hos planktonet eller for følgeeffekter af inkuberingen.

Indikationen af kvælstofs betydning som produktionsstyrrende faktor er i overensstemmelse med resultater fra tidligere undersøgelser i Kattegat (Granéli 1987, Granéli et al. 1990). Ved disse undersøgelser blev en øgning i klorofylkoncentrationen ved næringssalberigelse anvendt som indikator for næringsstofbegrensning.

Overensstemmelse med andre målinger

Referencer

- Banse, K. (1987): Clouds, deep chlorophyll maxima and the nutrient supply to mixed layers of stratified water bodies. - J. Plankton Res. 9, 1031-1036.
- Cembella, A. D., N. J. Antia og R. J. Harrison (1984): The utilization of inorganic and organic phosphorus compounds as nutrients by eukaryotic microalgae, a multidisciplinary perspective, Part 1 - Crit. Rev. Microbiol. 10, 317-391.
- Chiaudani, G. og M. Vighi (1982): Multistep approach to identification of limiting nutrients in the Northern Adriatic eutrophied coastal waters. - Water Res. 16, 1161-1166.
- Collos, Y. (1986): Time-lag algal growth dynamics, biological constraints on primary production in aquatic environments. - Mar. Ecol. Prog. Ser. 33, 193-206.
- Dugdale, R. C. og J. J. Goering (1967): Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. - Limnol. Oceanogr. 12, 196-206.

- Dugdale, R. C. og I. P. Wilkerson (1986): The use of  $^{15}\text{N}$  to measure nitrogen uptake in eutrophic oceans; experimental considerations. - Limnol. Oceanogr. 31, 673-689.
- Elrifi, I. R. og D. H. Turpin (1985): Transient photosynthetic responses of nitrogen limited microalgae to nitrogen addition. - Mar. Ecol. Prog. Ser. 20, 253-258.
- Eppley, R.W. og B.J. Peterson (1979): Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. - Nature 282, 677-680.
- Falkowski, P. G. og D. P. Stone (1975): Nitrate uptake in marine phytoplankton: Energy sources and interaction with carbon fixation. - Mar. Biol. 32, 77-84.
- Fenchel, T. (1988): Microfauna in pelagic food Chains. - i 'Nitrogen cycling in coastal marine environments', eds. T. H. Blackburn og J. Sørensen. John Wiley and sons, Chichester, 59-65.
- Fisher, T. R., Carlson, P. R. og R. T. Barber. (1982): Carbon and nitrogen primary productivity in three North Carolina estuaries. - Est. Coast. Shelf Sci 15, 621-644.

- Furnas, M. T. (1983): Nitrogen dynamics in lower Narragansett Bay, Rhode Island. I. Uptake by size-fractionated phytoplankton populations. - J. Plankton Res. 5, 657-676.
- Garber, J. H. (1984): Laboratory study of nitrogen and phosphorus remineralization during the decomposition of coastal plankton and seston. - Est. Coast. Shelf Sci. 18, 685-702.
- Garside, C. (1981): Nitrate and ammonia uptake in the apex of the New York Bight. - Limnol. Oceanogr. 26, 731-739.
- Glibert, P. M. og J.J. McCarthy (1984): Uptake and assimilation of ammonium and nitrate by phytoplankton: indices of nutritional status for natural assemblages. - J. Plankton Res. 6, 667-697.
- 
- Granéli, E. (1987): Nutrient limitation of phytoplankton in a brackish water bay highly influenced by river discharge. - Est. Coast. Shelf Sci. 25, 555-565.
- Granéli, E., K. Wallström, V. Larsson, W. Granéli og R. Elmgren (1990): Nutrient limitation of primary production in the Baltic Sea area. - Ambio 19, 142-151.

- Harrison, W. G., D. Douglas, P. Falkowski, G. Rove, og S. Vidal (1983): Summer nutrient dynamics of the Middle Atlantic Bight: nitrogen uptake and regeneration. - *J. Plankton Res.* 5, 539-556.
- Harrison, W. G. og L. R. Harris (1986): Isotope dilution and its effect on the measurement of nitrogen and phosphorus uptake by oceanic microplankton. - *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 27, 253-261.
- Healey, F. P. (1974): Inorganic nutrient uptake and deficiency in algae. - *Crit. Rev. Microbiol.* 3, 69-113.
- Healey, F. P. og L. L. Hendzel (1979): Fluorometric measurement of alkaline phosphatase activity in algae. - *Freshwat. Biol.* 9, 429-439.
- Kristiansen, S. og E. Paasche (1982): Preparation of  $^{15}\text{N}$ -labeled phytoplankton samples for optical emission spectrometry. - *Limnol. Oceanogr.* 27, 373-375.
- Laws, E. A. (1985): Analytic models of  $\text{NH}_4^+$  uptake and regeneration experiments. - *Limnol. Oceanogr.* 30, 1340-1350.
- Lean, D. R. S. og F. R. Pick (1981): Photosynthetic response of lake plankton to nutrient enrichment: A test for nutrient limitation. - *Limnol. Oceanogr.* 26, 1001-1019.

Lyngby, J. E., 1986: Anvendelse af fytoplankton og makroalger til belysning af nærings-saltbegrensning og tilgængelighed i kystnære områder. - Vand og Miljø 3. Årg. nr. 2, 57-60.

Mahoney, J. B. 1989: Algal assay of relative abundance of phytoplankton nutrients in northeast United States Coastal and Shelf waters. - Water Res. 23, 603-615.

McCarthy, J. J., W. R. Taylor og J. I. Taft (1977): Nitrogenous nutrition of the plankton in Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences. Limnol. Oceanogr. 22, 996-1011.

NPO-redegørelsen (1984). MILJØstyrelsen, København, 1-218.

Parson, T. R. (1975): Particulate organic carbon in the sea. - i 'Chemical Oceanography', eds. J. P. Riley og G. Skirrow. (II. edit). Acad. Press., 365-383.

Paasche, E. (1988): Pelagic primary production in nearshore waters. - i 'Nitrogen cycling in coastal marine environments', eds. T. H. Blackburn og J. Sørensen. John Wiley & sons, Chichester, 33-37.

Redfield, A. C. (1958): The biological control of the chemical factors in the environment. - Am. Sci. 46, 205-221.

- Rhee, G.-Y. (1982): Effects of environmental factors and their interactions on phytoplankton growth. - *Adv. Micr. Ecol.* 6, 3-74.
- Rosenørn, S. (1989): Meteorology. - i 'The occurrence of Chrysocromulina polylepis in Skagerrak and Kattegat in May/June 1988. An analysis of extent, effects and causes', eds. H. Barth og A. Nielsen. Commiss. Euro. Commun., Water Poll. Res. Rep. 10, 21-35.
- Rydberg, L. og J. Sundberg (1986): Seasonal nutrient supply to coastal waters. - i 'Marine Interfaces Hydrodynamics', eds. J.J. Nihoul, Elsevier Oceanography series 42, 467-488.
- Sahlsten, E., F. Sörensson og K. Pettersson (1988): Planktonic nitrogen uptake in the south-eastern Kattegat. - *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 121, 221-246.
- Sakshaug, E. og Y. Olsen, (1986): Nutrient status of phytoplankton blooms in the Norwegian Waters and algal strategies for nutrient competition. - *Can. J. Fish. Aq. Sci.* 43, 389-396.
- Selmer, J.-S. (1988): Ammonium regeneration in eutrophicated coastal waters of Sweden. - *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 44, 265-273.

- Selmer, J.-S. og F. Sörensson (1986): New procedure for extraction of ammonium from natural waters for  $^{15}\text{N}$  isotopic ratio determinations. - Appl. Env. Microbiol. 52, 577-579.
- Smetacek, V. og F. Pollehnne (1986): Nutrient cycling in pelagic systems: A reappraisal of the conceptual framework. - Ophelia 26, 401-428.
- Suttle, C. A. og P. J. Harrison (1988): Ammonium and phosphate uptake rates, N:P supply ratios, and evidence for N and P limitation in some oligotrophic lakes. - Limnol. Oceanogr. 33, 186-202.
- Sørensen, J. og M. H. Jensen (1990): Denitrifikation og N-remineralisering i den kystnære havbund. - NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, Cl.
- Sörensson, F., K. Petersson, J.-S. Selmer og E. Sahlsten (1989): Flows of nitrogen in a mesocosm experiment in the Baltic Sea. - Mar. Ecol. Prog. Ser. 58, 77-88.
- Säby Johansen, H. (1984): Improved optical analysis of traces depleted or slightly enriched in  $^{15}\text{N}$ . - Int. J. Appl. Radiat. Isot. 35, 1039-1043.
- Ward, B. B., K. A. Kilpatrick, E. H. Renger og R. W. Eppley (1989): Biological nitrogen cycling in the nitracline. - Limnol. Oceanogr. 34, 493-513.

Vejle Amt (1989): Vandkvalitetsundersøgelser i  
Horsens, Vejle og Kolding Fjord - Vejle  
Amt 1977-1988. - Vejle Amt, udvalget for  
teknik og miljø.

Vincent, W. F. (1981): Rapid physiological as-  
says for nutrient demand by phytoplank-  
ton. II. Phosphorus. - J. Plankton Res.  
3, 399-710.

Yentsch, C. M., C. S. Yentsch og L. R. Strube  
(1977): Variation in ammonium enhance-  
ment, an indication of nitrogen defici-  
ency in New England coastal phytoplank-  
ton populations. - J. Mar. Res. 35, 537-  
555.

Ertebjerg, G., L. A. Jørgensen, P. Sandbeck, H.  
Kaas og J. N. Jensen (1990): Marine Om-  
råder - Vandmiljøplanens overvågnings-  
program. DMU-publication, København, 1-  
100.







# Registreringsblad

**Udgiver:** Miljøstyrelsen, Strandgade 29, 1401 København K.

**Serietitel, nr.:** NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, C8

**Udgivelsesår:** 1990

**Titel:**

Kvælstof og fosfor i havet

**Undertitel:**

**Forfatter(e):**

Kaas, Hanne; Kaas, Henrik; Møhlenberg, Flemming

**Udførende institution(er):**

Danmarks Miljøundersøgelser. Afdelingen for Havmiljø og Mikrobiologi

**Resumé:**

Undersøgelser af kvælstof- og fosfordynamik i frie vandmaser i det åbne Kattegat og i Vejle Fjord viste kvælstof som styrende faktor for primærproduktion og ammonium som væsentligste kvælstofkilde. Remineralisering i vandsøjlen medfører ammoniumbaseret produktion i Kattegat, og i sommerhalvåret er tilbageholdelse og genudnyttelse af næringsalte stor. I Vejle Fjord øker væsentlig næringssalttilsel fra land og fra sedimentet, ensbetydende med en rumlig adskillelse af produktion og forbrug af næringsalte.

**Emneord:**

Kattegat; Vejle Fjord; kystvande; næringsstoffer; sedimenter; omsætning; tidssvarianter; svilkalger; biomasse; primærproduktion; nitrogen CAS 7727-37-9; fosfor CAS 7723-14-0

**ISBN:** 87-503-8868-1

**ISSN:**

**Pris:** 70,- (inkl. 22 % moms)

**Format:** A5

**Sideantal:** 64 s.

**Md./år for redaktionens afslutning:** december 1990

**Oplag:** 500

**Andre oplysninger:**

Rapport fra koordinationsgruppe C for vandløb, seer og marine områder

**Tryk:** Luna-Tryk ApS, København

# Kvælstof og fosfor i havet

Undersøgelser af kvælstof- og fosfordynamik i frie vandmaser i det åbne Kattegat og i Vejle Fjord viste kvælstof som styrende faktor for primærproduktion og ammonium som væsentligste kvælstofkilde. Remineralisering i vandsøjlen medfører ammoniumbaseret produktion i Kattegat, og i sommerhalvåret er tilbageholdelse og genudnyttelse af næringssalte stor. I Vejle Fjord sker væsentlig næringssaltilførsel fra land og fra sedimentet, ensbetydende med en rumlig adskillelse af produktion og forbrug af næringssalte.



Miljoministeriet **Miljøstyrelsen**

Strandgade 29, 1401 København K, tlf. 31 57 83 10

**Pris kr. 70.- inkl. 22% moms**

ISBN nr. 87-503-8868-1